



Vf 113196  
X/ 00 2057472

Biblioteka Gl. AWF w Krakowie



1800051864

20153





LE  
MOTEUR HUMAIN

PRIX NET SANS MAJORATION



## OUVRAGES DU MEME AUTEUR

---

- Le moteur humain et les bases scientifiques du travail professionnel.** *Préface* de H. LE CHATELIER, membre de l'Institut, xvi-690 pages 12 × 18, avec 324 figures (1923). Trad. angl. des professeurs Butterworth et Wright ; London (1920).
- Organisation physiologique du travail (valides et invalides).** *Préface* de H. LE CHATELIER, membre de l'Institut. xii-374 pages 16 × 25, avec 134 figures (1917)..... 36 fr.  
Trad. angl. du professeur Stanley Kent ; London (1918).
- La prothèse et le travail des mutilés.** *Conférence.* 27 pages 16 × 25, avec 4 figures (1916)..... 4 fr. 50
- Le devoir agricole et les blessés de guerre.** 22 pages 16 × 25, avec 8 figures (1917) ..... 2 fr.
- Les lois scientifiques de l'éducation respiratoire.** In-8° de 120 pages et 26 figures (1920)..... 18 fr.
- L'orientation professionnelle.** ii-78 pages 16 × 25, avec 20 figures (1920) ..... 11 fr.
-

*Travaux 104 726*  
*2.000*

# LE MOTEUR HUMAIN

ET

**LES BASES SCIENTIFIQUES DU TRAVAIL PROFESSIONNEL**

PAR

**Jules AMAR**

DIRECTEUR DU LABORATOIRE DE RECHERCHES

SUR LE TRAVAIL PROFESSIONNEL

AU CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS

DOCTEUR ES SCIENCES

MEMBRE CORRESPONDANT DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES DE LISBONNE

AVEC UNE PRÉFACE DE

**Henry Le CHATELIER**

MEMBRE DE L'INSTITUT, INSPECTEUR GÉNÉRAL DES MINES

PROFESSEUR A LA SORBONNE

---

*Ouvrage honoré d'une souscription du Ministère du Travail  
et du Ministère du Commerce*

---

2<sup>e</sup> ÉDITION

---

PARIS

**DUNOD, ÉDITEUR**

47 ET 49, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS (VI<sup>e</sup>)

1923

---



130

012: 012.7: 66(69-057.18

## PRÉFACE DE LA 1<sup>re</sup> ÉDITION

---

Le développement inouï de l'industrie pendant le XIX<sup>e</sup> siècle a été la conséquence immédiate de l'épanouissement des sciences expérimentales. La loi de conservation de la masse de Lavoisier donne naissance à l'analyse chimique, et celle-ci est le point de départ de tous les progrès de la métallurgie moderne. L'expérience d'Oerstedt sur l'aiguille aimantée crée toute l'industrie électrique. La loi de compressibilité des gaz de Mariotte et les expériences de Regnault sur les tensions de vapeur permettent le développement de la machine à vapeur et la création des machines frigorifiques. Les quatre formes de l'énergie matérielle : mécanique, calorifique, électrique et chimique, sont l'objet d'études incessantes, et chaque découverte se traduit aussitôt par un progrès industriel correspondant. La cinquième forme de l'énergie, celle des moteurs animés et en particulier celle du moteur humain, reste, malgré son usage continuel dans l'industrie, assez peu connue. Les quelques recherches de laboratoire faites à son sujet ne sont aucunement utilisées jusqu'ici par les industriels. Il n'y a rien là qui doive surprendre : entre l'expérience d'Oerstedt et la dynamo, il s'est écoulé un demi-siècle. Les phénomènes biologiques, infiniment plus complexes que ceux de la

physique et de la chimie, commencent à peine à se débrouiller ; les progrès très lents aujourd'hui s'accéléreront sans doute bientôt d'une façon vertigineuse. Il en a été ainsi au début de la découverte du courant galvanique ; les recherches, d'abord peu nombreuses et semblant dénuées d'intérêt pratique, se sont multipliées aujourd'hui à tel point qu'il est devenu impossible de se tenir au courant des nouvelles découvertes qui se succèdent de jour en jour.

Le livre de M. Amar arrive précisément au moment psychologique où il peut rendre les plus grands services ; c'est une mise au point des méthodes actuellement employées pour étudier le mécanisme et le fonctionnement de la machine humaine. Après avoir, dans un premier livre, rappelé les principes essentiels de la mécanique rationnelle, il en fait l'application aux membres de l'homme, c'est-à-dire aux différentes pièces mécaniques de la machine. Il étudie tout particulièrement le rôle des muscles et des os. Un second livre rappelle les conditions de transformation de l'énergie chimique et calorifique en travail mécanique. Comme la machine à vapeur, l'organisme humain brûle un combustible approprié, les aliments. De nombreux résultats ont déjà été réunis par les physiologistes sur l'énergie disponible soit pour produire le travail, soit pour subvenir aux pertes du corps par rayonnement, et entretenir la température la plus favorable au bon fonctionnement de la machine. Enfin, les derniers livres résument les recherches très intéressantes, mais malheureusement trop rares, faites sur la production du travail humain, et tout spécialement les très importantes recherches de l'auteur de ce volume.

Les inspecteurs du travail trouveront là un *vade*

*mecum* très utile pour leurs études dans les usines, faites en vue de s'assurer que les méthodes de travail employées imposent seulement à l'ouvrier la fatigue minimum, nécessaire à l'obtention d'un résultat donné. Les ingénieurs d'usine en tireront le même profit pour arriver à obtenir d'une fatigue donnée le maximum de rendement. Les méthodes sont identiques pour résoudre les deux problèmes réciproques : minimum de fatigue à production égale ou maximum de production à fatigue égale. L'intérêt est le même pour les ouvriers et les patrons de réduire au minimum l'usure de la machine humaine ; on ne peut refuser à cette dernière les soins que l'on accorde depuis longtemps à la machine à vapeur.

L'opportunité de cette publication se trouve d'autre part liée à une révolution des méthodes industrielles dues à l'énergique initiative d'un ingénieur américain : M. F.-W. Taylor, dont les *Principes d'organisation scientifique des usines* sont maintenant la préoccupation de tous les ingénieurs.

Jusqu'ici l'industrie s'était contentée d'utiliser certains résultats scientifiques qui avaient été obtenus en dehors d'elle, sans aucune préoccupation des applications possibles. La méthode suivie avait été celle des sciences pures, c'est-à-dire abstraites. Pour démêler les lois des phénomènes naturels, on a depuis longtemps reconnu la nécessité de scinder les problèmes, de n'étudier à la fois qu'une seule face de chaque phénomène. C'est ainsi que le chimiste, ignorant systématiquement les propriétés mécaniques et électriques de la matière, est parvenu à reconnaître la loi de conservation des éléments et celle des proportions multiples sur lesquelles il a fondé toute l'analyse chi-

mique. Ces lois, les seules utilisées aujourd'hui par les industriels, rendent certainement de très grands services ; mais elles ne constituent pas à elles seules toute la science.

L'idée de F.-W. Taylor a été d'introduire dans l'industrie non seulement les lois de la science pure, mais plus encore la méthode scientifique elle-même. En présence du problème industriel le plus fréquent, l'obtention à bon marché d'un produit de bonne qualité, il recherche systématiquement tous les facteurs dont dépend le résultat poursuivi, et il s'efforce de les rattacher entre eux par des relations numériques, dont la connaissance exacte doit permettre d'atteindre à coup sûr le but visé. Cette science industrielle envisage simultanément la multiplicité des points de vue que comportent les phénomènes réels, tandis que la science pure simplifie infiniment sa tâche en n'envisageant jamais à la fois qu'un seul aspect des phénomènes.

Les phénomènes réels les plus simples en apparence sont déjà extrêmement complexes. Ainsi le travail des métaux sur le tour, particulièrement étudié par Taylor, dépend de douze *variables indépendantes* au moins. Parmi ces variables, le facteur humain est de beaucoup le plus important. Si le rendement mécanique des machines ordinaires a été l'objet de recherches incessantes en raison des répercussions sur la consommation du combustible, un des principaux éléments du prix de revient, le rendement des hommes, au contraire, a été jusqu'ici à peine étudié dans les usines. C'est sur ce point spécial que F.-W. Taylor concentre aujourd'hui la majeure partie de ses efforts.

Il a d'abord démontré l'inexactitude d'un préjugé très répandu. Les bons ouvriers, dit-on, savent bien

utiliser eux-mêmes leurs forces pour obtenir avec la moindre fatigue un résultat donné. C'est là une erreur complète, et Taylor l'a établi sur le plus simple de tous les exemples : le transport des fardeaux. Dans ce travail, la fatigue est fonction de cinq variables, et il est impossible à l'ouvrier de trouver par des tâtonnements les valeurs les plus avantageuses de chacune de ces variables : poids transporté à chaque voyage, distance parcourue, inclinaison du chemin, vitesse à pleine charge, vitesse à vide au retour et temps de repos, sans parler des conditions dépendant de la santé physique et morale de l'ouvrier. En étudiant systématiquement l'influence de ces variables dans le cas du transport de gueuses de fonte, F. W. Taylor a réussi à tripler, sans augmentation de fatigue, le poids transporté journellement par ses ouvriers. Il a pu ainsi doubler leur salaire tout en réservant un bénéfice important à son usine.

Mais cette étude du moteur humain donne lieu, quand on veut la faire dans les usines, comme Taylor, à de graves difficultés. Elle repose sur le *chronométrage* de tous les mouvements des ouvriers, opération dont les intéressés ne comprennent pas toujours la nécessité. Elle provoque parfois de vives protestations de leur part, car elle semble viser à obtenir un effort plus grand sans une augmentation correspondante des salaires, supposition qui est la négation même du but poursuivi par l'inventeur de cette méthode ; elle choque, en même temps, leur amour-propre qui juge déshonorant d'être soumis à des mesures expérimentales comme une simple machine. La répercussion de ces préoccupations se manifeste très nettement dans un rapport présenté récemment au Sénat américain, à

l'occasion d'une protestation des syndicats ouvriers contre l'introduction des méthodes scientifiques de travail dans les arsenaux de l'État.

Il y a, d'autre part, une difficulté très sérieuse à déterminer exactement le degré de fatigue des ouvriers. Il n'est pas certain que des ingénieurs, étrangers aux questions physiologiques, soient absolument qualifiés pour suivre de semblables études; peut-être serait-il plus rationnel de laisser ce soin aux physiologistes, comme on laisse aux chimistes le soin d'étudier les méthodes d'analyse employées ensuite dans les usines.

Un exemple emprunté aux recherches mêmes de M. Amar montrera la nature de cette difficulté. Voulant étudier d'une façon précise la fatigue produite chez l'homme par le transport des fardeaux, et ne voulant pas se contenter des déclarations toujours sujettes à caution du patient, il se traça le programme suivant : faire exécuter à un même ouvrier, tous les jours, pendant un certain temps, le même travail en lui fournissant une ration alimentaire d'entretien approprié à son travail, puis suivre d'un jour sur l'autre les variations de son poids, la fatigue causée par un excès de travail étant accusée par une diminution de poids. N'ayant pu trouver en France des sujets d'expérience qui consentissent à s'astreindre à la monotonie d'existence qui leur était imposée, il dut se transporter au nord de l'Afrique pour recruter des portefaix présentant sans doute, comme le dit Taylor, « le tempérament physique et moral du bœuf ».

Cette collaboration des laboratoires scientifiques avec les usines se produit d'une façon incessante pour l'utilisation des énergies inanimées ; elle doit donner des résultats aussi satisfaisants avec le moteur humain,

à la condition, cependant, que les chercheurs veuillent bien tenir compte de la nature des problèmes posés dans l'industrie. La plupart des recherches scientifiques accomplies jusqu'ici par les physiologistes ont surtout visé à établir une relation entre le travail mécanique produit et l'énergie dépensée de façon à vérifier le grand principe de conservation de l'énergie. Dans ces calculs, il faut tenir compte au même degré du travail utile, c'est-à-dire extérieur à l'ouvrier, et du travail interne occasionné par le mouvement de ses membres, de son cœur et de ses poumons. Pour l'industriel, le travail extérieur compte seul, et le problème intéressant est de définir les conditions qui peuvent, pour une fatigue donnée de l'ouvrier, amener ce travail extérieur à sa valeur maxima, abstraction faite de toute question de rendement thermique. Quel effort à exercer, quelle vitesse des mouvements, quelle fréquence et quelle durée des repos permettent à l'ouvrier de faire le plus grand travail possible dans sa journée ?

On entrevoit déjà un certain nombre de lois ; il faut les préciser et les multiplier de façon à offrir aux industriels un ensemble de documents où ils pourront puiser pour organiser le travail dans leurs ateliers, sans avoir à soumettre leurs propres ouvriers à des sujétions expérimentales toujours désagréables. Il est inutile de mettre en trop grande lumière une cuisine préparatoire dont les détails parfois difficiles à comprendre peuvent donner lieu à des malentendus ; il faut seulement montrer aux ouvriers le résultat final, l'augmentation de salaire que les méthodes scientifiques de travail leur permettent de réaliser à coup sûr.

On ne doit pas cependant se laisser entraîner à l'illusion qu'ouvriers et syndicats verront avec un

enthousiasme débordant l'application de ces nouvelles méthodes de travail. Leurs protestations sont une conséquence nécessaire de l'ignorance générale des hommes sur leurs véritables intérêts. Ils devraient se féliciter de la possibilité qu'on leur offre de diminuer considérablement leur fatigue à production égale ou de doubler leur salaire à fatigue égale. Ils n'en feront peut-être rien. Lors du développement des machines, ils ont presque unanimement protesté contre une évolution de l'industrie qui a finalement décuplé en un siècle leur bien-être. Ils profiteront de même, malgré eux, des bienfaits de l'organisation scientifique des usines. Il faut avoir foi dans le progrès et continuer hardiment l'étude du moteur humain. Les tourbillons contraires qui errent sur les rives d'un grand fleuve n'en altèrent pas le cours.

HENRY LE CHATELIER,  
de l'Institut.

Paris, 1<sup>er</sup> octobre 1913.

---

## AVANT-PROPOS DE LA 1<sup>re</sup> ÉDITION

---

Cet ouvrage arrive à temps, croyons-nous, pour bénéficier des découvertes d'une science entrée depuis peu dans la vie économique des nations : la science du *Travail humain*.

Il est conçu, le premier dans ce genre, en vue de stimuler les recherches et de guider les applications, sur lesquelles l'œuvre des Chauveau et des Taylor a provoqué la plus vive curiosité. Il rappelle aussi — ce que nous avons presque oublié — que les études relatives au travail humain, à sa mesure, à ses multiples modalités, à ses conditions mécaniques et physiologiques, eurent en France leur origine, que cette origine certaine fut placée par Coulomb, dès 1783, sur le domaine commun des sciences physiques et biologiques.

Aussi, des notions élémentaires de mécanique générale, sans appareil mathématique, devaient-elles précéder tout notre exposé et servir d'éclaircissements au lecteur ; des indications sur les lois de l'Energetique humaine, fournir les moyens de mesurer le travail musculaire et la fatigue avec une rigueur et une fidélité que ne connaissent pas les procédés des savants américains ; et des notes bibliographiques, choisies et vérifiées avec soin, étaient-elles nécessaires pour que le

détail ne vint pas étouffer le principal, et qu'il fût possible de remonter aux sources.

Nous avons voulu, en un mot, réunir les éléments physiques et physiologiques relatifs au *travail professionnel* dans un texte qui se suffise à lui-même. Nous ne pouvions avoir réussi que très imparfaitement dans cette besogne si difficile, avec une matière dispersée, complexe, réfractaire aux simplifications qui plaisent au grand public. Détachée de ses fondements mécaniques, elle eût perdu toute solidité, et nous aurions fait œuvre vaine. Ne pas avoir marqué les limites physiologiques d'une *activité normale*, exempte de surmenage, c'eût été méconnaître la nature du moteur vivant.

Nous avons examiné, à ce point de vue, le *système de Taylor*, qui a produit dans toutes les industries un profond retentissement.

L'augmentation du rendement de l'ouvrier soulevait le problème *des rapports du travail et du salaire*. En dehors de quelques observations incidentes, nous nous sommes tenu à l'écart de ces discussions économiques ; elles auraient débordé notre ouvrage. Et, enfin, nous mettons partout en évidence les raisons de s'entendre qu'employeurs et employés trouvent dans une organisation scientifique du travail ; elles résultent de leur intérêt bien compris ; elles n'entraînent ni sacrifice matériel, ni concession morale,

Salva fide et integra dignitate.

L'impartialité a toujours été notre guide ; elle éclate dans la magistrale préface que M. Le Chatelier a écrite avec tant d'autorité, et dont nous le remercions affectueusement ; elle rayonne dans toutes nos recherches, car, sans elle, il n'y a pas de science véritable.

Malheureusement, les lacunes sont nombreuses dans le tableau des travaux professionnels; nous les avons signalées pour provoquer, à leur endroit, des études complètes; et nous espérons beaucoup des conseils et des lumières des hommes compétents; ce sera leur manière à eux d'être bienveillants pour notre modeste labeur.

---

## AVANT-PROPOS DE LA 2<sup>e</sup> ÉDITION

---

Neuf ans séparent cette édition de la précédente. La guerre et ses tristes conséquences les ont presque entièrement occupés, au détriment de la recherche scientifique.

Mais il y a eu, malgré cela, quelques travaux intéressants, dont il nous a paru nécessaire de faire profiter cet ouvrage, seul de son genre.

Si, au texte primitif, nous n'avons eu à apporter ni changements ni corrections; si notre règle absolue, de ne rien admettre qui pèche par imprécision, nous avait épargné les erreurs, raison de plus pour enrichir et parfaire notre documentation.

Aussi, telles de nos additions constituent de véritables études. C'est le cas pour l'analyse des phénomènes de nutrition dans leurs rapports avec la qualité de l'aliment et sa réduction quantitative: question des *Vitamines* et problème de la *Sous-Alimentation*, indices de

force et de croissance normales, rôle économique ou stimulant de certains aliments.

Plusieurs chapitres ont été complétés, notamment à propos de l'*Éducation physique* et de la *Locomotion*, de l'*Aviation*, de la *Cinématographie*, des actions de milieu : lumière, *électricité*, du rôle des *sens* et de la mesure de leur acuité au moyen du *psychographe*, de l'*écriture*, etc.

On a beaucoup ajouté à la *Technique expérimentale* où, en dehors du précédent appareil, se trouvent décrits le *Trottoir dynamographique*, le *Crescographe* et tant d'autres enregistreurs nouveaux. Le tableau des *professions* s'est également élargi, même au point de vue psychologique. Une place importante a été faite aux recherches concernant la *Construction* et les *Terrassements* dont l'intérêt actuel est si grand.

Il n'a pas été possible, malheureusement, de faire bénéficier de ces additions la remarquable traduction que les professeurs Butterworth et Wright ont donnée de notre *Traité* (1). Car c'est pour nous une fierté qu'il ait obtenu, du public de langue anglaise, le même généreux accueil que du lecteur français.

Espérons que ce nouvel effort sera jugé digne de leur attention.

(1) *The Human Motor* and *The Scientific foundations of Labour*. In-8° 309 illustrations; London, 1920.

Paris, mars 1923.

---

# LE MOTEUR HUMAIN

---

## LIVRE I

### NOTIONS DE MÉCANIQUE GÉNÉRALE

---

#### CHAPITRE I

**1. Généralités.** — L'étude d'une machine quelconque relève des lois de la *mécanique générale* ; celle-ci est donc le guide indispensable dès qu'il s'agit de problèmes d'*équilibre* et de *mouvement*. Historiquement, elle est la science des machines (de μηχανη, machine) ; mais on lui a donné, ainsi particularisée, le nom de *mécanique appliquée*.

Par contre, faisant abstraction de la nature des corps en mouvement, on a constitué une *mécanique rationnelle*.

Et suivant qu'elle s'occupe des lois du mouvement exclusivement, ou de ses causes déterminantes, causes appelées *forces*, on divise la *mécanique rationnelle* en *cinématique* ou science du mouvement (de κίνημα, mouvement) et *dynamique* ou science des forces (de δύναμις, force).

Cette seconde partie n'est elle-même que le développement de problèmes relatifs à l'équilibre des forces, en un mot de la *statique* (de στατική, équilibre).

Nous aurons donc trois divisions :

- 1° Cinématique (étude du mouvement en soi) ;
- 2° Statique (étude de l'équilibre des forces) ;
- 3° Dynamique (étude des forces en mouvement).

Il est clair que ces distinctions visent à la simplicité, à la logique ; elles n'empêchent pas de restituer ensuite aux corps étudiés toutes leurs propriétés physiques. La *mécanique appliquée* fait précisément état de ces propriétés, surtout des

*déformations* que la matière subit par l'application des forces ; elle considère en un mot la *résistance des matériaux*, c'est-à-dire la limite des efforts que les solides peuvent supporter.

Toutes ces notions éclairent d'un jour très vif les mécanismes de l'activité humaine ; on ne les comprendrait pas sans elles. C'est pourquoi nous avons tenu à les résumer pour éviter au lecteur l'aridité des ouvrages spéciaux et les inexactitudes inséparables des grandes simplifications. La vérité, comme le génie, résulte d'un long et patient effort <sup>(1)</sup>.

**2. I. Cinématique : le mouvement.** — Quand nous voyons un corps changer de place, nous disons qu'il est *en mouvement*, et nous admettons qu'il était *en repos*. En réalité, le mouvement est *relatif* et résulte de la comparaison du corps qui se meut à un autre corps supposé *fixe* et servant de *repère*. Il suffit de songer que l'homme se déplace sur le globe terrestre, lequel tourne sur lui-même et autour du soleil, et que le soleil se dirige aussi dans l'espace vers une étoile particulière.

Réduisons le *mobile* à un *point*. Son mouvement décrira une *trajectoire*, soit une ligne droite, soit une ligne courbe. Et ce mouvement sera dit *uniforme* ou *varié* suivant que les déplacements qui se produisent en des temps *égaux* seront *égaux* ou *inégaux*. L'unité de temps est la *seconde*. On appellera *vitesse* du mouvement uniforme l'espace parcouru dans cette unité de temps : la seconde. Soit  $v$  la vitesse ; au bout de  $t$  secondes, le mobile parcourt un espace  $e$  tel que :

$$e = vt.$$

C'est là l'*équation du mouvement uniforme*.

Mais si le mouvement est *varié*, la vitesse augmente ou diminue d'un instant à l'autre, elle *s'accélère*. On désigne l'*accélération* par la lettre grecque *gamma* :  $\gamma$ . Dans ces conditions, la vitesse n'est plus une constante ; c'est celle qui existe à un instant déterminé, pour changer l'instant d'après. Pratiquement, c'est le rapport de l'espace au temps, ce dernier

(1) On pourra, toutefois, dans une première lecture, passer les paragraphes imprimés en petits caractères.

étant choisi le plus petit possible. On a ainsi une *vitesse moyenne*.

A la limite extrême de la petitesse, en faisant le rapport d'un espace infiniment petit à un temps infiniment petit, on obtient la vitesse du mouvement varié à l'instant considéré. En mathématique, on écrit  $\frac{de}{dt} = v$ , et on dit que  $v$  est la *dérivée* de l'espace par rapport au temps.

De la même façon la vitesse subit une accélération  $\gamma$  dans un temps infiniment petit; l'accélération est donc la dérivée de la vitesse par rapport au temps; on a :  $\gamma = \frac{dv}{dt}$ .

Un cas simple et fréquent est celui d'une *accélération constante*, la vitesse augmentant ou diminuant de quantités égales dans des temps égaux. La vitesse est nulle, par exemple, au moment de lâcher un corps suspendu; elle devient  $\gamma$  au bout de 1 seconde,  $\gamma t$  au bout de  $t$  secondes. Dans un pareil mouvement, que l'on qualifie d'*uniformément varié* (chute d'une pierre), la vitesse a passé de la valeur zéro à la valeur  $\gamma t$ ; la vitesse moyenne est :

$$v_m = \frac{0 + \gamma t}{2} = \frac{1}{2} \gamma t.$$

Tout se passe comme si la pierre tombait d'un mouvement uniforme — non varié — et à la vitesse  $v_m$ . L'espace parcouru  $e = v_m \times t$  sera donc :

$$e = \frac{1}{2} \gamma t \times t = \frac{1}{2} \gamma t^2.$$

Cette relation exprime la loi très connue de la chute des corps : les espaces parcourus sont proportionnels aux carrés des temps employés à les parcourir.

Le mouvement ainsi défini est *rectiligne*; mais nous avons dit qu'il peut être également *curviligne*, c'est-à-dire que la trajectoire du mobile sera une ligne courbe. Un des mouvements curvilignes les plus fréquents est celui où cette ligne représente une circonférence. La plupart de nos machines, les meules de moulin, les roues hydrauliques, les volants des

moteurs, etc., ont ce *mouvement circulaire*, et il est presque toujours uniforme.

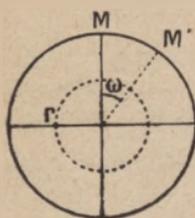


FIG. 1.

La vitesse du mobile M (fig. 1) dans un mouvement circulaire uniforme est l'arc décrit en une seconde. Si le mobile décrivait toute la circonférence  $2\pi r$  en  $t$  secondes, sa vitesse serait  $v = \frac{2\pi r}{t}$ . Si, en une seconde, il va de M en M', l'arc MM' sera  $\omega r = v$ . L'angle  $\omega$  (*oméga*) est appelé *vitesse angulaire du mobile*. Des deux expressions,

$\frac{2\pi r}{t}$  et  $\omega r$ , de  $v$ , on déduit :

$$\omega = \frac{2\pi}{t}.$$

Dans le cas des grandes vitesses, on considère le nombre de *tours* par seconde, soit  $n$  fois  $2\pi r$ .

Pour définir l'unité de vitesse, on suppose une circonférence de rayon égal à 1, c'est-à-dire  $2\pi$  (en pointillé), de sorte qu'elle conduise à ceci : le rayon étant pris pour *unité d'arc* sera compris  $2\pi$  fois dans la circonférence ; l'arc égal à ce rayon s'appelle *radian*, et il correspond à un angle de  $57^{\circ} 18'$  environ, car  $180^{\circ}$  (2 angles droits) correspondent à  $\pi$  radians :

$$\frac{180^{\circ}}{\pi} = \frac{180^{\circ}}{3,1416} = 57^{\circ} 18'.$$

Etant donné, par conséquent, une vitesse angulaire  $\omega$  (en degrés) on l'exprimera en radians par la relation :

$$\omega : \frac{180}{\pi} = \frac{\omega \pi}{180}.$$

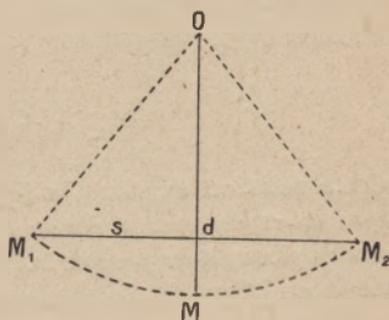


FIG. 2.

Le mouvement peut enfin être *oscillatoire* ou *pendulaire* ; il se révèle ainsi dans le va-et-vient du *pendule* (fig. 2) ou d'un

piston ; mais il est invisible dans les vibrations d'un diapason ; d'où son autre appellation de mouvement *vibratoire* ou *harmonique*. Le pendule est au repos dans la position  $OM$  ; lorsque, dans son oscillation, il occupe la position  $M_1$ , son *elongation* sera la distance  $M_1d = s$  ; puis il revient en  $M$  faisant une *oscillation simple*, remonte en  $M_2$ , accomplissant, à son retour en  $M$ , une *oscillation double*. L'angle  $M_1OM_2$  est l'*amplitude* du mouvement oscillatoire ; la durée d'une double oscillation est la *période*  $T$  du mouvement oscillatoire. Le nombre d'oscillations doubles par seconde est sa *fréquence*  $N$ .

Le mobile  $M$  se déplace comme à l'extrémité d'un rayon de longueur  $OM$ , et son elongation  $s$  augmente et diminue avec l'angle  $MOM_1$ , c'est-à-dire qu'elle dépend de la vitesse angulaire du point  $M$ . Dans le triangle  $OM_1d$ , on a :

$$s = OM_1 \sin \widehat{MOM_1} ;$$

d'ordinaire le rayon se désigne par  $a$  et on écrit :

$$s = a \sin \widehat{MOM_1} \text{ (fig. 3).}$$

En appelant  $\omega$  la vitesse angulaire du point oscillant, l'angle  $MOM_1$  sera égal à  $\omega t$  au bout du temps  $t$  que durera l'elongation. Donc :

$$s = a \sin \omega t.$$

Rappelons qu'étant donné, dans un cercle de rayon  $a$ , un angle  $MOM_1$ , son sinus est la perpendiculaire  $M_1d$  ; son *cosinus* est  $Od$  ; et l'on voit que le sinus prend les valeurs 0, 1, quand l'angle est nul ou est de  $90^\circ$  ; le *cosinus* varie de façon inverse. On donne le nom de *tangente* de l'angle  $MOM_1$  à la perpendiculaire  $TM$  sur  $OM$  qui coupe le rayon prolongé  $OM_1$  (fig. 4). D'après ces indications, l'amplitude des oscillations, évaluée par l'angle  $M_1OM_2$ , ou la demi-amplitude  $\omega t$  sera nulle pour  $\omega t = \text{zéro}$ , sin  $\omega t = 0$ , et l'elongation sera :  $s = 0$ . Pour

$\omega t = 90^\circ$  ou  $\frac{\pi}{2}$ , on aura sin  $\omega t = 1$  ; d'où  $s = a$ .

Remarquons qu'au bout d'une *période*  $T$ , le mobile est revenu à son point de départ, ayant parcouru  $360^\circ$  ou  $2\pi$  ; donc  $\omega t = 2\pi$ , ou

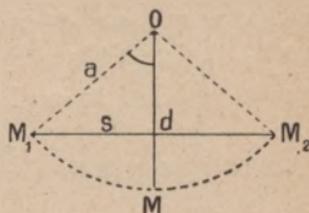


FIG. 3.

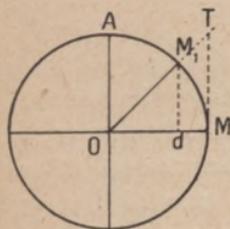


FIG. 4.

$t = \frac{2\pi}{\omega}$ ; la durée  $t$  est alors égale à  $T$ ; d'où  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ . D'autre part, il y a  $N$  oscillations doubles ou  $N$  périodes par seconde; donc:  $N \times T = 1$ , ou  $N = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$ , ou encore  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ . Ces calculs si simples montrent que, finalement, la valeur  $\omega t$  ou *phase* du mouvement s'exprime par:  $\omega t = \frac{2\pi t}{T}$ ; de sorte que la loi du mouvement harmonique devient de la forme:

$$s = a \sin \frac{2\pi t}{T}.$$

Quant à la *vitesse* du mouvement oscillatoire, elle atteint sa plus grande valeur au point de départ et va en diminuant jusqu'au bout de l'élongation; de  $M_1$  en  $M$  elle augmente peu à peu pour décroître ensuite progressivement de  $M$  en  $M_2$ . Il s'ensuit que l'*accélération* agit toujours pour ramener le mobile à sa position initiale  $M$ , au *centre d'oscillation*.

En prenant la dérivée  $\frac{ds}{dt}$ , l'expression de la vitesse sera:

$$v = \frac{2\pi a}{T} \cos 2\pi \frac{t}{T}$$

dont la valeur au départ est maximum, puisque  $\omega t = 0$ ,  $\cos 2\pi \frac{t}{T} = 1$ ; d'où  $v = \frac{2\pi a}{T}$ .

La dérivée  $\frac{dv}{dt}$  donne, pour l'accélération, l'expression:

$$\gamma = - \frac{4\pi^2 a}{T^2} \sin 2\pi \frac{t}{T}.$$

Les mouvements périodiques dont nous venons d'indiquer les éléments sont usuels; ils caractérisent les rabots, scies, pistons de pompe, etc. Ainsi, chez le scieur, le limeur, la vitesse de l'outil devient nulle à la fin de chaque oscillation. Et quel que soit le mouvement, il obéit à une loi plus ou moins complexe reliant l'*espace* et le *temps*, seuls éléments que considère la cinématique; il existe toujours, en un mot, une *équation* du mouvement.

**3. Représentation et enregistrement du mouvement.** — Etant donnée la trajectoire d'un point mobile, nous savons

qu'elle peut être rectiligne ou curviligne (R ou C). Dans le premier cas, la droite représente une *direction*  $XX'$ , le mobile pouvant se déplacer dans le sens  $XX'$  ou dans le sens opposé  $X'X$ . Une trajectoire rectiligne a donc une direction et deux sens opposés (*fig. 5*).

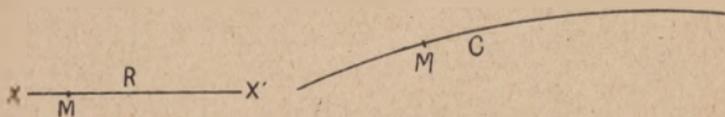


FIG. 5.

Mais la vitesse, si elle est  $MM'$  en une seconde, peut être représentée par cette portion de droite  $MM'$  à la condition que le mobile soit parti de  $M$  et ait atteint  $M'$  d'un mouvement uniforme (*fig. 6*).

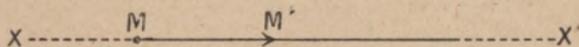


FIG. 6.

Le segment de droite  $MM'$  est appelé *vecteur*;  $M$  est son *origine*,  $M'$  son *extrémité* (on la marque d'une flèche). De sorte que le vecteur  $MM'$  (du latin : *vehere*, porter) représente en *direction, sens* et *grandeur* la vitesse du mobile. Si la vitesse change de sens, le mobile revenant de  $M'$  en  $M$ , le vecteur aura son origine en  $M'$ , son extrémité en  $M$  (sa flèche).

Dans le cas du mouvement curviligne, le mobile va de  $M$  en  $M'$  employant le temps  $t$ ; la vitesse à un instant donné, c'est la position *limite* d'une corde partant de l'origine  $M$  et parcourue en une seconde, c'est-à-dire la *tangente* en  $M$ , représentée par le vecteur  $MV$ . Quand le mobile est en  $M'$ , sa vitesse sera le vecteur  $M'V'$ , et ainsi de suite. Pour un mouvement uniforme, la vitesse est constante et l'on a :  $MV = M'V' = \dots$  (*fig. 7*). Pour un mouvement varié, le vecteur change de grandeur. Mais toujours, dans le mouvement curviligne, la vitesse change de *direction*, pour suivre la tangente à la courbe. C'est ainsi que la pierre d'une fronde, tout en se déplaçant suivant une circonférence, quitte

celle-ci avec une vitesse tangentielle acquise au point même où elle s'échappe.

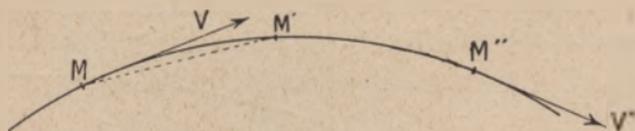


FIG. 7.

L'accélération est, de même, une *grandeur dirigée* ou un vecteur; nous rencontrerons plus tard d'autres grandeurs dirigées.

L'intérêt de ce mode de représentation est qu'il est intuitif; s'agit-il d'un point mobile qui prend, par rapport à un axe  $XX'$ , une direction  $AB$ ? S'il demeure dans le plan de ces deux axes, sa vitesse sera  $MV$ , par exemple, sur l'un d'eux,

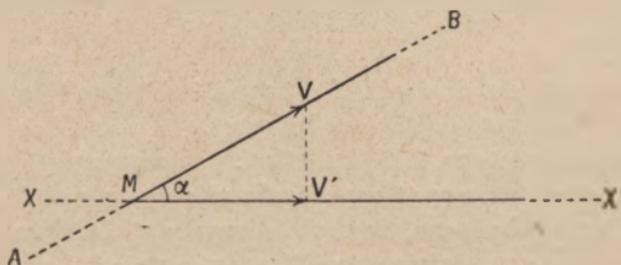


FIG. 8.

mais par rapport à l'autre ce sera la *projection*  $MV'$  de  $MV$ . On comprend, sans qu'il soit besoin d'insister, que la projection puisse se réaliser en faisant passer par  $V$  un plan perpendiculaire à l'axe de projection  $XX'$  (fig. 8).

En appelant  $\alpha$  l'angle des deux directions, on a :

$$MV' = MV \cos \alpha;$$

l'angle  $\alpha$  est dit un *cosinus directeur* de  $MV$ .

D'une manière plus générale, le mobile va de  $M$  en  $M'$  suivant la diagonale d'une chambre cubique ou parallélépipé-

dique (fig. 9); on veut connaître sa vitesse suivant les trois directions de la pièce, OX, OY, OZ. Pour cela on projettera MM' par deux plans parallèles à OZY qui donneront  $mm'$ ; par deux plans parallèles à ZBC qui fourniront  $m_1m'_1$ , et enfin par deux plans parallèles à BYD, qui limiteront le vecteur  $m_2m'_2$ . Si donc la vitesse du vecteur donné est MM', on aura trois vitesses faciles à calculer suivant les trois directions rectangulaires choisies.

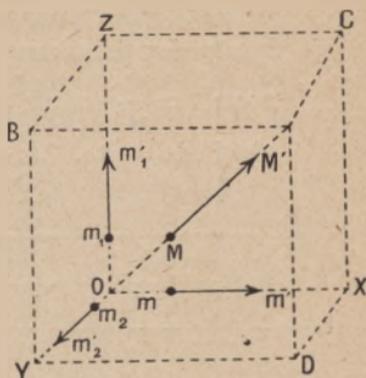


FIG. 9.

Si l'on appelle  $\alpha$ ,  $\beta$  (Bêta),  $\gamma$  les cosinus directeurs du vecteur MM', on aura :

$$mm' = MM' \cos \alpha, \quad m_1m'_1 = MM' \cos \beta, \quad m_2m'_2 = MM' \cos \gamma.$$

4. Équation et diagrammes. — Le mouvement en soi peut être défini par son équation; tels sont le mouvement pendulaire :

$$s = a \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T},$$

le mouvement rectiligne uniformément varié :

$$e = \frac{1}{2} \gamma t^2,$$

ou simplement le mouvement uniforme :

$$e = vt.$$

Mais on peut aussi le figurer par un tracé, appelé *diagramme* ou *graphique*. Soient deux axes rectangulaires OX et OY; l'axe OX est la *ligne des abscisses*; OY est la *ligne des ordonnées*; toutes deux sont appelées *Axes de coordonnées* et le point O en est l'*origine* (fig. 10). Si nous portons en abscisses le temps, c'est-à-dire les valeurs de  $t$  depuis zéro

jusqu'à  $T$  qui est la période, et si, d'autre part, nous portons en ordonnées les valeurs correspondantes de l'élongation, nous aurons le diagramme  $OT$  (ligne qui limite les hachures). En effet, pour  $t=0$ ,  $s=0$ ; pour  $t=\frac{T}{4}$ , on a :  $s=a$ ; pour  $t=\frac{1}{2}T$ ,  $s=0$ , et ainsi de suite. La courbe se reproduit périodiquement comme le mouvement.

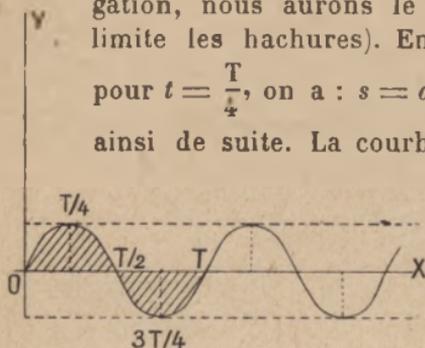


FIG. 10.

On l'appelle *sinusoïde*. Ainsi le mouvement vibratoire qui a pour équation :

$$s = a \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

est figuré par le diagramme ci-dessus ; on y voit clairement l'amplitude et la période du mouvement, et on se rend compte du caractère des oscillations ; cela fait image.

Prenons une loi plus simple, celle du mouvement uniforme :

$$e = vt.$$

Le mobile occupe deux positions  $M$  et  $M'$  aux temps  $t$  et  $t'$ . On portera les longueurs  $OP$  et  $OP'$  *proportionnelles aux temps* sur la ligne des abscisses, et les longueurs  $PM$  et  $P'M'$  (*fig. 11*) *proportionnelles aux espaces parcourus*, sur des axes d'ordonnées. La droite  $OMM'$ ... donnera le *diagramme* ou la *courbe* du mouvement. Connaisant l'équation d'un mouvement, il sera toujours possible de le représenter par un diagramme, un *graphique*. A cet effet on fera usage de *papier quadrillé*. En général, dans les équations analogues à  $e = vt$ , on dit qu'il y a deux *variables*  $e$  et  $t$ , l'espace et le temps, c'est-à-dire  $y$  et  $x$ . Leur relation constitue la *loi* du phénomène considéré. Ainsi la hauteur  $p$  du

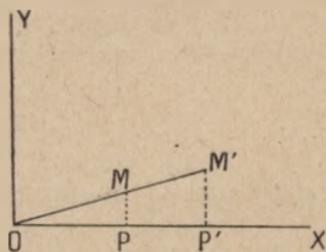


FIG. 11.

usage de *papier quadrillé*. En général, dans les équations analogues à  $e = vt$ , on dit qu'il y a deux *variables*  $e$  et  $t$ , l'espace et le temps, c'est-à-dire  $y$  et  $x$ . Leur relation constitue la *loi* du phénomène considéré. Ainsi la hauteur  $p$  du

baromètre diminue à mesure que l'on s'élève sur une montagne. La variation de l'une des hauteurs détermine celle de l'autre; de là ce nom de *variables*. D'ailleurs, on *choisit* une des variables, et grâce à leur relation, on calcule la valeur de l'autre. Pour les distinguer, pour marquer ce *choix*, on dit que l'on a *fixé la variable indépendante*, et obtenu une *fonction f*.

Il peut y avoir *plusieurs* variables indépendantes. Par exemple, la hauteur barométrique est fonction de la hauteur d'ascension  $h$  et de la température  $T$  de l'air, etc.

En algèbre, on écrit :

$$\begin{aligned} e &= f(t), \\ p &= f(h, T) \dots, \end{aligned}$$

pour désigner les fonctions ci-dessus mentionnées.

Mais quand il y a deux variables indépendantes, on se donnera *trois axes de coordonnées* rectangulaires pour représenter la variation de la fonction. Nous n'insisterons pas sur ce mode complexe. Et nous dirons que, pour trouver la loi d'un phénomène, il s'agira de demander à l'expérience un certain nombre de valeurs de la variable indépendante  $x$  et de sa fonction  $y$ , pour en déduire si possible une formule satisfaisante. Ainsi, écrivons  $y = f(x)$  pour le phénomène de propagation de la lumière,  $x$  étant la distance et  $y$  la quantité de lumière reçue sur une surface plane. L'expérience donne :

|   |   |    |  |
|---|---|----|--|
| A la distance 1, une quantité de lumière .. | 1 | .. | 1  |
| — 2,  | — | .. | $\frac{1}{4} = \left(\frac{1}{2}\right)^2$ |
| — 3,  | — | .. | $\frac{1}{9} = \left(\frac{1}{3}\right)^2$ |
| . . . . .                                   |   |    |  |

Il n'est pas douteux, d'après cela, que  $y$  soit inverse du carré de  $x$ , ou que  $y = \frac{1}{x^2}$ .

$\frac{1}{x^2}$  est la *forme* de la fonction cherchée.

De même, dans le cas de la chute des corps,  $y = f(x)$  est

tel que  $y = \frac{1}{2} \gamma t^2$ . Le diagramme donné

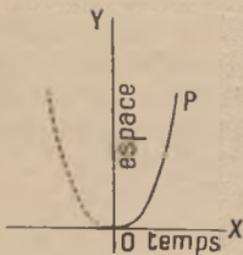


FIG. 12.

par cette équation est un arc de *parabole* OP passant à l'origine (fig. 12), qui manifeste aux yeux l'accroissement plus rapide de l'espace que du temps.

5. **Méthode graphique.** — Au lieu de faire les graphiques sur les données de

l'expérience, par des *mesures* nécessairement entachées d'*erreurs* (voir à la *Technique*, livre V, § 193), on s'est ingénié à les faire tracer *directement* par le point mobile. Reprenons l'exemple de la *chute d'un corps*, et soit une pointe inscrivante, fixée à un morceau de plomb, qui tombe devant un cylindre recouvert de papier; le cylindre peut tourner

autour de son axe. Supposons-le au repos et faisons tomber le corps traceur de M en M'; nous noterons la durée  $t$ , et l'espace parcouru  $e = MM'$ ; ce qui

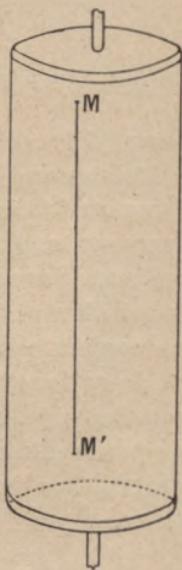


FIG. 13.

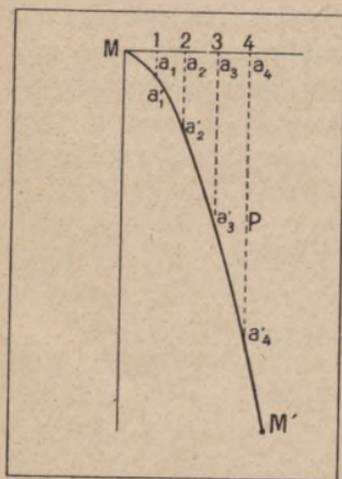


FIG. 14.

ne renseigne nullement sur la variation de l'espace en fonction du temps (fig. 13); mais faisons tourner le cylindre autour de son axe, par un mouvement d'horlogerie, à une vitesse connue et constante; nous aurons, en développant la feuille sur un plan (fig. 14), les espaces parcourus dans des temps égaux. En un mot, les temps,

1, 2, 3 ... secondes seront en abscisses, les espaces  $a_1a'_1$ ,  $a_2a'_2$ ... seront en ordonnées; et l'on trouvera que ces espaces ont augmenté comme les *carrés* des temps. La courbe décrite sera un *arc de parabole* MPM'.

De même, si l'on munit un diapason vibrant d'une pointe appelée *style* (une soie de sanglier), cette pointe, en frottant

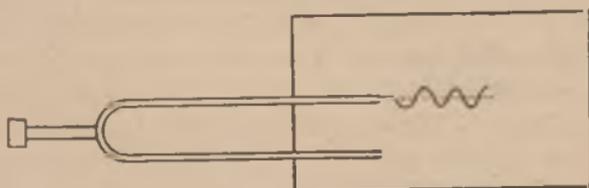


FIG. 15.

légèrement sur une plaque recouverte de *noir de fumée*, y tracera une *sinusoïde* (fig. 15).

Tel est le principe de la *méthode graphique* ou d'enregistrement direct. Employée pour la première fois par le général Morin sur les indications de Poncelet, elle fut portée à son plus haut degré de perfection par Marey.

Le physiologiste Marey (1830-1904) lui donna une forme plus pratique en recourant à la *transmission par l'air*; il imagina,

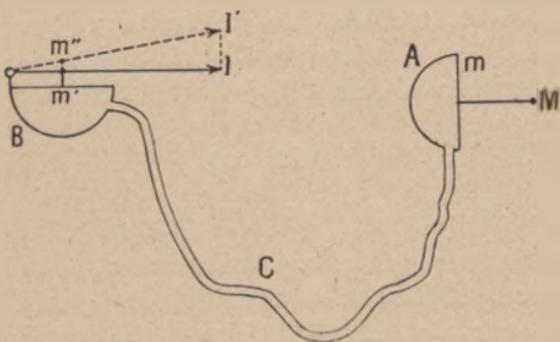


FIG. 16.

à cet effet, le *tambour* qui porte son nom : c'est une cavité métallique fermée par une membrane de caoutchouc *m*. Le point mobile *M* est rendu solidaire du centre de cette membrane,

qu'il repousse ou tire suivant le sens de son mouvement; les compressions et dilatations que l'air subit dans la cavité A (fig. 16) sont transmises par un tube de caoutchouc à un tambour B, dans lequel une pointe inscrivante est articulée au milieu de la membrane  $m'$ . Ainsi tous les mouvements du point M sont transmis à la pointe I, et peuvent s'inscrire sur un cylindre ou une plaque mobiles.

Le tambour *récepteur* B pourra toujours *se conjuguer* avec un tambour *explorateur* A adapté à la nature du mouvement. En outre, la longueur du style pouvant se modifier, de petits mouvements seront *amplifiés* dans la proportion voulue. Il est aisé de voir que le petit déplacement en  $m'$  se traduira par la longueur  $II'$  (voir *Technique*, livre V, § 203).

6. **Méthodes photographiques.** — Mais la *photographie* a résolu d'une façon plus frappante et plus belle les problèmes de cinématique. Déjà « l'instantané » a permis de prendre, de fixer sur la pellicule sensible les positions d'un point ou d'un corps mobiles d'un moment à un autre. Cette durée est cependant trop longue. Muybridge et Marey eurent alors recours à la *chronophotographie*; son principe actuel est que la pellicule sensible, le « film », se déplace à une vitesse connue, et, par des artifices d'obturation qui masquent et démasquent rapidement l'objet, se trouve impressionnée à des intervalles très rapprochés. Les « obturateurs instantanés » ne permettent donc qu'une *action photochimique* de très courte durée; mais la sensibilité du gélatino-bromure est telle qu'une durée de pose de  $\frac{1}{100.000}$  de seconde suffit quand

on opère au soleil. En pratique, on ne dépasse pas  $\frac{1}{500}$  de seconde. Le film avance, à chaque obturation, de la longueur d'une épreuve, et l'on obtient ainsi un grand nombre d'images en *série*, à intervalles égaux (chevaux de course, oiseaux, etc.).

Avec son *chronophotographe*, Marey obtint des images de 9 centimètres carrés. Aujourd'hui, on arrive à prendre 200 photographies par seconde. S'agit-il d'un corps en mouvement, on en fixe la position initiale par rapport à des

repères convenablement choisis dans l'espace, et on dispose sur une même figure les divers calques des photographies ; on pourra suivre, dès lors, les diverses positions d'un même point du corps en fonction du temps. Bull est même parvenu à obtenir 250 photographies, ayant 2 centimètres de longueur, en  $1/100$  de seconde, grâce à l'emploi de l'étincelle électrique réfractée par un prisme <sup>(1)</sup>.

Au lieu de la pellicule mobile du film, Marey, après Janssen, avait employé la *plaque fixe* ; on ne pouvait obtenir, dans ces conditions, que quelques images, et le corps ne devait pas être de grande surface pour éviter la superposition. Aussi, quand l'objet est volumineux (cheval au galop, homme qui saute), on en fixe certains points ou lignes remarquables, en les rendant *brillants*, le sujet étant noir ou revêtu de velours noir et se déplaçant devant un fond noir. Par exemple, des baguettes blanches ou des *galons* (fig. 17) indiqueront l'épine dorsale, la ligne qui joint les épaules et celle qui joint les hanches.

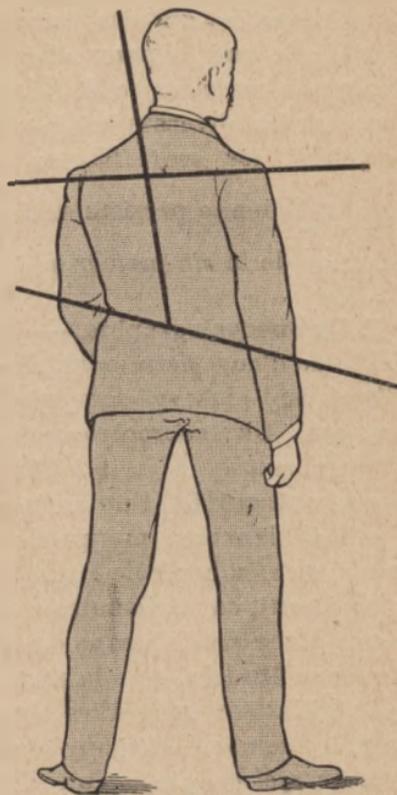


FIG. 17.

Au Parc des Princes, où Marey installa un laboratoire, les sujets passent, sur une piste en pavés noircis, devant l'ouverture d'un hangar dont le sol et les parois sont également noircis, et le fond garni de velours noir. L. Soret <sup>(2)</sup> disposait de petites lampes à incandescence sur la tête et aux pieds,

(1) L. Bull (C. R. Acad. Sc., 10 avril 1922, t. CLXXIV).

(2) J.-L. Soret (C. R. Acad. Sc., 1885, t. CI).

et photographiait ainsi les mouvements choréographiques. L'Américain Fred. Colvin munit l'index de l'ouvrier d'une bague ornée d'un *chaton électrique*. On a donc la trajectoire du corps mobile, une vue d'ensemble du mouvement effectué.

La méthode des points et lignes constitue la *chronophotographie géométrique*. C'est celle qui a servi à l'étude analytique ds la *locomotion animale*, du mouvement des projectiles, etc. ; c'est d'elle que Démeny d'abord, Lumière ensuite, ont fait dériver le *cinématographe*. L'emploi de *films* permet de faire repasser les diverses images à une vitesse qui, si elles sont projetées, les *synthétise* au regard, attendu que l'impression rétinienne persiste environ  $\frac{1}{20}$  de seconde : tel est le principe de la *cinématographie* (1).

**7. Chronocyclographie.** — Frank Gilbreth a employé une méthode d'enregistrement plus complète et plus instructive. Elle répond plus spécialement à la science des *mouvements ouvriers*. Un *microchronomètre*, donnant le millionième d'heure, soit environ le  $1/278$  de seconde, est combiné avec le cinématographe. Une horloge ordinaire, à cadran noir et aiguilles blanches, marque le temps total écoulé à chaque expérience, et contrôle l'enregistrement du temps. Quant au mouvement, sa trajectoire est donnée par la tache lumineuse d'une petite lampe électrique attachée à l'index de la personne étudiée, ou à la partie mobile du corps.

En définitive, on réalise simplement une image sur pellicule, image complète pour former l'unité de mouvement. Ce sera un *cyclographe*, qu'un dispositif fera voir *stéréoscopiquement*.

Gilbreth n'a pas, à vrai dire, utilisé le principe même du cinéma ; car son enregistrement du temps est tout différent, et plus facile à observer. Il a introduit, dans le circuit électrique de la lampe, un diapason vibrant, dont les interrup-

(1) Voir J.-L. Breton, *la Chronophotographie* (in *Rev. scient. et indust.* 1897, p. 179) (chez E. Bernard et C<sup>ie</sup>) ; Marey, *la Chronophotographie*, 1899 ; Karl Marbe, *Theorie der Kinematographischen Projectionen*, Leipzig, 1910 ; Jacques Ducom, *le Cinématographe*, Paris, 1911 ; L. Lobel, *la Technique cinématographique*, 1922.

lions font apparaître la trajectoire, non en ligne continue, mais en points lumineux. L'espace qui les sépare représentera des centièmes ou millièmes de secondes, suivant la hauteur du diapason choisi.

En outre, le voltage et l'ampérage sont tels que la lampe s'allume brusquement, et s'éteint lentement. Le point lumineux a donc l'aspect d'une *flèche* qui donne elle-même la *direction* du mouvement.

L'appareil qui sert à la méthode a reçu le nom de *Chronocyclographe*, et quelquefois celui de *Autostéréochronocyclographe*, afin de rappeler qu'il est automatique et à figures en relief.

On pourra lire, dans un intéressant ouvrage de l'auteur <sup>(1)</sup>, le détail de cette technique, et les applications très nombreuses qu'elle autorise: travail industriel, culture physique, opérations chirurgicales, etc.

Un autre avantage de ces procédés, c'est qu'ils rendent possible l'enregistrement de mouvements s'effectuant dans des plans et directions variés. Les cyclogrammes recueillis font apparaître les *mouvements-types*; ils enseignent à éliminer les gestes superflus, par conséquent inutiles, et source de gaspillage.

Il y a lieu de répandre, dans les usines et même dans les écoles, cette précieuse invention de l'ingénieur américain, à laquelle M<sup>me</sup> Gilbreth a pris une part très importante.

**8. Mouvements des corps.** — Les corps naturels sont des *systèmes*, non des *points matériels*; on les suppose, pour simplifier, *indéformables*, les distances de leurs points demeurant invariables; en réalité, ces *solides parfaits* n'existent pas; ils se déforment plus ou moins. Quoi qu'il en soit, les mouvements d'un solide sont les suivants :

1<sup>o</sup> *Mouvements de translation.* — Le corps se déplace sans tourner, chacune des droites de ce corps reste parallèle à elle-même. Un tel mouvement est réalisé par l'emploi de *guides* (comme dans les tables avec rallonges), de *galets* (ana-

(1) F. B. Gilbreth et L.-M. Gilbreth, *Motion Study for the Handicapped*; London, 1920. Voir p. 6 à 17.

logues aux roulettes des fauteuils) qui passent dans une rainure, de billes, etc.

2° *Mouvements de rotation.* — Ici, certains points du corps demeurent fixes sur une droite appelée *axe de rotation*, pendant que le mouvement a lieu, et chaque point du corps a la même *vitesse angulaire de rotation*. Les mouvements de rotation sont assurés par des axes horizontaux ou verticaux terminés par des *pointes*, *pivots* ou *tourillons*; s'ils ne doivent pas être d'un tour complet, on fait usage de *gonds* et de *charnières*: c'est le cas des portes, des couvercles de boîtes, etc.

3° *Mouvements hélicoïdaux.* — Le corps animé d'un mouvement hélicoïdal tourne autour de l'axe, tout en se déplaçant le long de cet axe; il y a rotation et translation. La rotation peut se faire dans un sens ou dans le sens opposé, de sorte qu'un observateur placé dans l'hélice ainsi décrite (fig. 18) la voit s'enrouler de sa gauche à sa droite (hélice

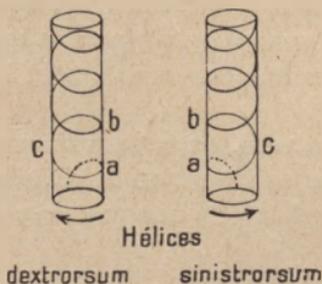


FIG. 18.

*dextrorsum*) ou de sa droite à sa gauche (hélice *sinistrorsum*). Le premier type d'hélice, la *dextrorsum*, est le plus fréquent; c'est celui des tire-bouchons, des vis, etc.

On nomme *pas* de l'hélice la distance verticale *ab* de deux *spires*, la *spire* étant l'arc compris entre deux points consécutifs d'une même génératrice; c'est, par exemple, la spire *acb*.

9. *Composition des mouvements.* — Un point ou un système matériels peuvent être animés de mouvements diffé-

rents; dans ce cas, il est possible de les composer entre eux d'après le *principe du parallélogramme*. Ainsi, étant sur une barque, laissons tomber une pièce de métal; elle ira verticale-

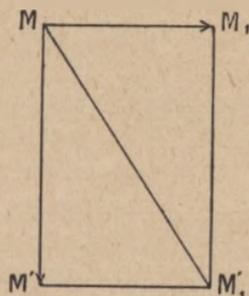


FIG. 19.

ment de M en M'; si la barque est en mouvement, de telle façon qu'elle atteigne le point M<sub>1</sub> dans le même temps, la

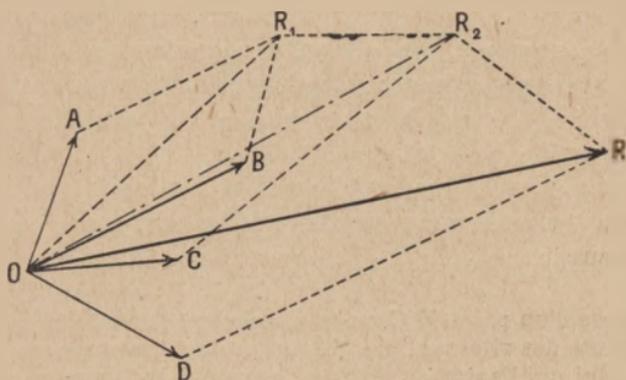


FIG. 20.

pièce de métal arrivera au point M'<sub>1</sub>, ayant suivi la diagonale du parallélogramme MM<sub>1</sub>M'M'<sub>1</sub> (fig. 19). Une application, souvent mentionnée, de ce théorème est celle du *nageur* qui veut traverser une rivière, passer d'un bord au bord opposé. Il devra composer sa vitesse propre avec celle du courant pour suivre le chemin de passage *le plus court*.

On déterminerait par là la *résultante* de deux vecteurs

exprimant des grandeurs quelconques : vitesse, accélération, etc.

Il y aurait eu 3, 4, ... mouvements ou vecteurs à composer, qu'il eût été aussi simple de composer la résultante des deux premiers avec le troisième, cette nouvelle résultante avec le quatrième, et ainsi de suite (fig. 20) jusqu'à la résultante définitive OR.

Réciproquement, deux directions OX et OY étant données,

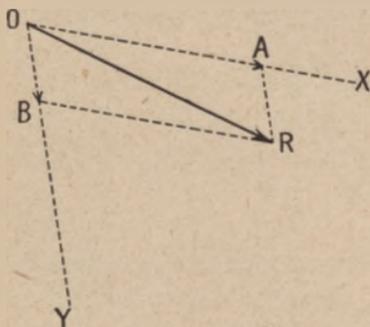


FIG. 21.

on peut décomposer un mouvement ou un vecteur en deux autres (fig. 21), en menant par l'extrémité R les parallèles à ces directions; ce qui détermine OA et OB. On décomposerait de même en trois ou plusieurs vecteurs.

Généralement, un vecteur donné doit être décomposé suivant les trois directions rectangulaires de l'espace, direc-

tions qui pourraient, cependant, être quelconques. Alors on emploie la construction connue du *parallélépipède*, qui est, pour l'espace, ce que la construction du parallélogramme est pour le plan (voir § 3).

En tant que vecteurs, les vitesses et les accélérations se composent et se décomposent sur le même mode que les mouvements.

La vitesse d'un point M dans le mouvement résultant est aussi la résultante des vitesses du point M dans son mouvement propre et dans celui qui l'entraîne. Et il en est ainsi de l'accélération.

Lorsqu'un point est animé de deux ou plusieurs mouvements, rectilignes et uniformes, son mouvement résultant est aussi rectiligne et uniforme et a pour vitesse la résultante des vitesses. Mais si les mouvements rectilignes sont quelconques, il en résultera un mouvement curviligne. Tel était le cas ci-dessus de la chute d'un corps ayant conduit à un arc de parabole (§ 5).

Les vecteurs représentant les mouvements de rotation se composent comme précédemment. Et nous avons vu qu'une rotation et une translation uniformes engendrent un mouvement hélicoïdal (§ 7). Mais, si l'on compose une translation et une rotation

autour d'un axe perpendiculaire à la direction de cette translation on décrit une trajectoire appelée *cycloïde* (fig. 22), ABD pour le point M ; ce sont les courbes décrites par les roues d'un véhicule

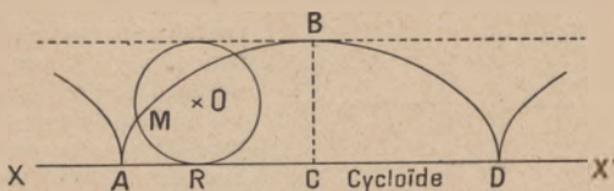
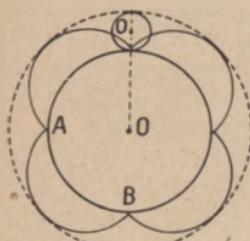


FIG. 22.

sur un sol bien plan. Les cycloïdes se succèdent ainsi séparées par les points de rebroussement A, D,... ; le point B est le plus élevé de la trajectoire, qui est symétrique de part et d'autre de la perpendiculaire BC.

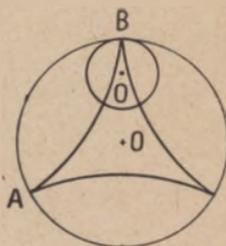
La droite XX', sur laquelle roule la circonférence O, porte le nom

de base ; la circonférence est dite *roulette*. Les figures de la base et de la roulette peuvent, néanmoins, être quelconques ; on pourrait avoir une sphère roulant sur une autre sphère, ou à l'intérieur d'une autre sphère ; la trajectoire est alors



Épicycloïde

FIG. 23.



Hypocycloïde

FIG. 24.

une *épicycloïde* (fig. 23) ou une *hypocycloïde* telles que AB (fig. 24).

On remarquera que dans le roulement d'une courbe sur une autre, il y a toujours contact et que, un arc donné de la première s'applique, coïncide à un arc de la seconde. Si la base est immobile et que la roulette la touche indéfiniment, continûment, tout en tournant, cette base devra être une *surface réglée*, c'est-à-dire exempte d'inegalités.

Mais si, dans le mouvement, les points qui coïncidaient ont cessé de l'être, il y aura eu *glissement* d'un solide sur l'autre, c'est-à-dire translation.

Remarquons aussi que, dans la cycloïde, la position du point M est donnée par la tangente en ce point, MT ; la normale MR à cette tangente vient couper le diamètre RR' perpendiculaire à cette base en un point R qui est précisément le point de contact, le *point coïncident*. En un mot, les différentes positions de M pourraient

résulter de rotations autour des points  $R^1, R^2, \dots$  ainsi déterminés; ces points sont dits *centres instantanés de rotation* (fig. 25).

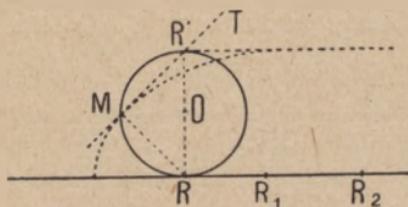


FIG. 25.

D'une manière générale, toute figure qui se meut dans son plan peut passer d'une position (1) à une position (2) au moyen d'une rotation autour d'un *centre instantané*. Les normales aux trajectoires décrites fournissent ce centre.

En effet, soit une droite de la figure telle que, dans le déplacement de celle-ci, deux points A et B viennent en A' et B' (fig. 26). Les trajectoires sont AA' et BB', les normales en leurs milieux se coupent au centre de rotation cherché R. Si la position finale (2) est telle que AB' soit parallèle à AB, les normales aux trajectoires seront aussi parallèles, et le centre de rotation sera à l'infini; de

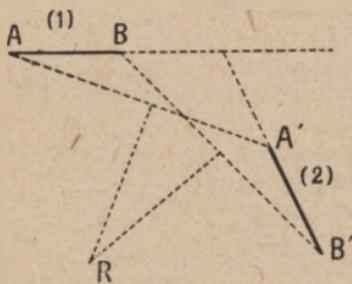


FIG. 26.

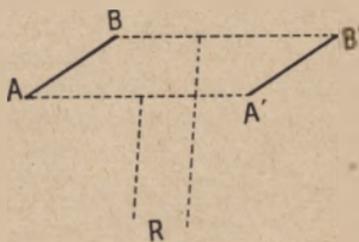


FIG. 27.

sorte qu'une rotation dans ces conditions équivaut à une translation AA' BB' (fig. 27).

L'exemple de la cycloïde, où les déplacements élémentaires entraînent l'existence de centres de rotation successifs, justifie ce nom de *centre instantané*.

Enfin, si l'on considère un solide comme une pile de figures planes, on comprendra que, par une *même rotation*, tout le solide puisse passer d'une position à une autre; tous les centres de rotation seront alors disposés sur une même droite appelée *axe instantané de rotation*. Evidemment cet axe instantané pourrait être supposé situé à l'infini, quand il y a translation du solide.

En généralisant, on s'assure que le mouvement d'un solide dans l'espace peut toujours se ramener à une translation suivie d'une rotation; or cela revient à un mouvement hélicoïdal (§ 7), analogue à celui d'une vis qui pénètre dans son écrou.

10. **Transmission du mouvement.** — Nous mentionnerons simplement la transmission des mouvements circulaires, par *courroies* ou *roues dentées*.

Dans un *engrenage*, la plus petite des roues dentées s'appelle *pignon*; et il y a, en général, une *roue menante* et une *roue menée*. Les nombres de dents doivent être entre eux dans un rapport inverse de celui des vitesses angulaires. Si, par exemple, l'on veut que la roue menée tourne 10 fois plus vite que la menante, on donnera à cette dernière 10 fois plus de dents qu'à l'autre.

Toutefois ce nombre de dents est limité par la résistance du métal et la grandeur des efforts à supporter.

Si l'on veut qu'un mouvement circulaire continu autour d'un axe s'effectue autour d'un axe parallèle, et dans le même sens, on utilise les roues dentées, au nombre de trois au moins. Celle du milieu transmet la rotation, sans changer la vitesse.

Dans le cas où les axes sont très écartés, la transmission se fera grâce à des *poulies*, reliées par courroie ou par *chaîne*. Et, suivant que le mouvement doit avoir lieu dans le même sens, ou en sens inverse, les deux brins de la courroie seront directs ou croisés.

On verra des exemples de transmission du mouvement dans la mécanique animale.

11. **Systèmes articulés.** — Pour transformer un mouvement d'une certaine nature en un autre, on a recours aux *systèmes*

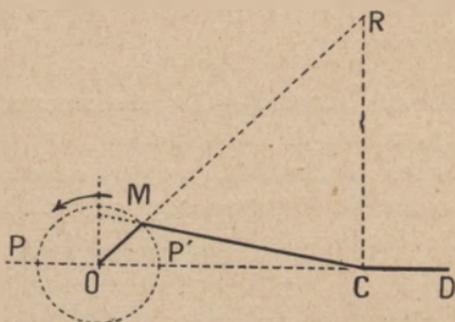


FIG. 28.

*articulés*; il suffit de rappeler l'exemple de la *bielle à manivelle* qui transforme un mouvement rectiligne alternatif en un mouvement circulaire continu, et inversement. La rotation est produite autour de l'axe O (*fig. 28*) par la manivelle OM, articulée à la bielle MC, qui imprime à la tige CD un mouvement rectiligne alternatif; il est aisé de voir que les normales en M et C donnent la position R pour le centre de rotation instantané; en outre, si CD transmet

le mouvement à OM, le point M sera en P ou P', dans la direction de CD, et ne pourra franchir ces deux positions, appelées *points morts*, qu'en vertu de la vitesse acquise, car, en ces points, la vitesse devrait être nulle.

Les *encliquetages* sont aussi des mécanismes de transformation du mouvement, tandis que, pour transmettre ce dernier, on emploie des *joints*, des *excentriques*, des *comes* (voir les traités spéciaux de cinématique appliquée).

12. **Le temps.** — La cinématique étudie, avons-nous dit, le mouvement, c'est-à-dire l'*espace* et le *temps*, d'où résulte la notion de vitesse. L'unité de temps, la *seconde*, représente une durée trop grande pour l'étude détaillée, analytique du mouvement. Aussi bien, la *cinématographie* et la *physiologie* emploient-elles des dispositifs leur permettant d'enregistrer des intervalles de temps de  $\frac{1}{1.000}$  de seconde et parfois — mais

rarement — de  $\frac{1}{10.000}$  de seconde. On les décrira plus loin (*Technique*, livre V, § 205). Pour nous, le temps et l'espace sont des grandeurs physiques, *réelles, mesurables*. La *doctrine d'Einstein*, qui tend à inspirer le doute à cet égard, est purement *artificielle*.

13. II. **Étude des forces.** — Le mouvement est le seul phénomène qui relève de l'observation; on peut l'étudier, en déterminer les lois sans faire appel à aucune hypothèse. Quant à la *cause* du mouvement, elle n'ajoute rien de précis à cette étude, elle apparaît même comme une notion métaphysique qui embarrasse la science. Cependant, qu'il s'agisse du mouvement d'un point ou d'un système matériels, on a dénommé *force* la cause qui le produit; et quand le mouvement est uniforme, c'est encore la force qui peut modifier cette uniformité. Effectivement, le corps donné persisterait dans son état de repos ou dans son mouvement uniforme, si aucune action extérieure ou force n'agissait sur lui. Il y persisterait en vertu de ce que l'on a appelé son *inertie*.

Ainsi, le *principe de l'inertie* introduit — mais pas nécessairement — la notion de force.

Nous disons : pas nécessairement, car d'éminents mécaniciens ont pu se passer de cette notion dans tous les développements des lois mécaniques. Tels Kirchhoff, en 1877, et Hertz, en 1894. Carnot écrivait, déjà, en 1803 : « Que peut-on bien entendre, dans le langage précis des mathématiques, par une force, c'est-à-dire par une cause double ou triple d'une autre ?... Les causes sont-elles la volonté ou la constitution physique de l'homme ou de l'animal qui, par son action, fait naître le mouvement? — Mais qu'est-ce qu'une volonté double ou triple d'une autre volonté? (1) ».

Un exemple, partout présent, de force, est donné par l'action de la terre sur les corps qui sont à sa surface, action appelée *pesanteur* ; les corps sont attirés par la Terre et y tombent verticalement d'un mouvement uniformément accéléré, en vertu d'une force spéciale ; leur accélération est constante en un même lieu ; on la représente par la lettre  $g$ , et elle équivaut à  $9^m,81$  environ, c'est-à-dire que l'accélération d'un corps qui tombe est  $9^m,81$  au bout d'une seconde. Au lieu de  $e = \frac{1}{2} \gamma t^2$ , on écrira :  $e = \frac{1}{2} g t^2$ . Un corps, placé sur une table, y exerce une *pression* à raison de la pesanteur ; une main qui repousse un obstacle exerce une pression ou mieux un *effort*. Il semble que la notion de force dérive inconsciemment de la sensation d'*effort musculaire*, qu'il s'agisse d'une traction, d'une pression, de la distension d'un fil de caoutchouc, de la flexion d'un bâton, en un mot de toutes sortes de *déformations*. Force et déformation sont, réellement, la cause et l'effet, et l'une sert de *mesure* à l'autre ; c'est sur la déformation des *ressorts* qu'est fondée la mesure des forces ou *dynamométrie* (voir *Technique*, § 218).

La force de la pesanteur existe entre les astres de l'univers et a reçu le nom d'*attraction universelle* ou de *gravitation*. Sur terre, la valeur de l'accélération  $g$  qu'elle imprime aux corps diminue avec l'altitude et augmente avec la latitude ; mais ces variations sont pratiquement insensibles dans l'ordre de choses que nous considérons. Quant à l'origine de cette force universelle, il y a des présomptions en faveur des phénomènes d'attraction électrique ; peut-être l'attraction ou *affinité chimique* se rattache-t-elle à la

(1) Lazare Carnot, *Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement*, 1803 ; préface, p. x.

même théorie. Nous verrons, d'autre part, à quelle hypothèse a conduit l'origine de la force musculaire (§ 364).

La force est une grandeur dirigée, un vecteur; elle possède une direction, un sens et une *intensité* ou grandeur; en outre, elle a un *point d'application* sur le corps où elle agit. Tout ce qui a été dit au sujet des vecteurs en général convient rigoureusement aux forces.

14. **Composition et décomposition des forces.** — Deux forces  $F_1$  et  $F_2$  se composent suivant le principe du parallélogramme (§ 8) et ont une *résultante*  $R$  (fig. 29); les vecteurs  $F_1, F_2$  et  $R$  mesurent les *intensités* composantes et résultante. On a un exemple de cette composition dans la traction à la cordelle sur l'avant d'un bateau: deux chevaux sont placés sur

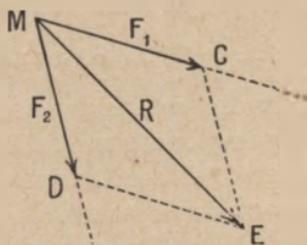


FIG. 29.

l'une et l'autre rives, le bateau s'avance dans la direction du cours d'eau.

L'intensité de  $R$  est facile à évaluer. Dans le triangle  $MCE$ , on a :

$$CE = F_2 \quad \text{et} \quad R^2 = F_1^2 + F_2^2 - 2F_1F_2 \cos \widehat{MCE}.$$

Or les angles en  $C$  et  $M$  sont *supplémentaires* (valent ensemble  $180^\circ$ ), ce qui entraîne que le cosinus positif de l'un est égal au cosinus négatif de l'autre.

Donc :

$$- \cos \widehat{MCE} = + \cos \widehat{CMD} = + \cos \widehat{F_1, F_2}.$$

Ce qui donne enfin :

$$R^2 = F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos \widehat{F_1, F_2}.$$

Ainsi, connaissant les deux forces et l'angle qu'elles forment, on en déduit l'intensité de la résultante.

Lorsque ces forces agissent à angle droit,

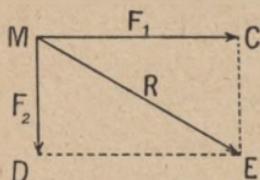


FIG. 30.

$$\cos \widehat{F_1, F_2} = \cos 90^\circ = 0:$$

par suite :

$$R^2 = F_1^2 + F_2^2;$$

ce que la figure (fig. 30) montre avec évidence sur le triangle rectangle MCE.

On composerait de même trois ou plusieurs forces et on calculerait leur résultante.

Inversement, une force  $R$  étant donnée, on la décomposerait en deux, trois ou plusieurs autres forces, s'il y a lieu. En deux, d'après le principe du parallélogramme ; en trois, d'après celui du parallélépipède (§ 8) ; s'il y a plus de trois directions, le problème est indéterminé. En général, le mode de décomposition affecte trois directions rectangulaires. Soient  $F_1$ ,

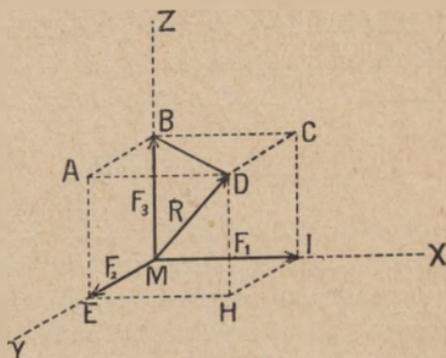


FIG. 31.

$F_2$ ,  $F_3$  les trois forces à déterminer suivant ces directions  $X$ ,  $Y$  et  $Z$ , et  $R$  la force connue (fig. 31); au moyen des plans projetants, nous formerons le parallélépipède ABCDEMHI qui assignera aux forces cherchées les intensités  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ .

Remarquons que dans le triangle rectangle BMD, l'hypoténuse MD donne :

$$\overline{MD}^2 = \overline{BM}^2 + \overline{BD}^2;$$

et dans le triangle rectangle BDC, on a :

$$\overline{BD}^2 = \overline{BC}^2 + \overline{CD}^2.$$

Donc :

$$\overline{MD}^2 = \overline{BM}^2 + \overline{BC}^2 + \overline{CD}^2,$$

c'est-à-dire que le carré de la résultante est égal à la somme des carrés des composantes; soit :

$$R^2 = F_1^2 + F_2^2 + F_3^2,$$

ou en général :

$$R^2 = X^2 + Y^2 + Z^2.$$

Nous savons d'ailleurs que les cosinus-directeurs (§ 3) permettent d'écrire :

$$F_1 = R \cos \alpha, \quad F_2 = R \cos \beta, \quad \text{et} \quad F_3 = R \cos \gamma.$$

Dans ces conditions, si, inversement, on donnait les trois forces, il serait aisé d'évaluer l'intensité de leur résultante, et, grâce aux cosinus directeurs, d'en trouver la direction.

Il est inutile d'ajouter que si la résultante  $R$  et une des deux forces rectangulaires  $F_1$  sont données, l'autre  $F_2$  (fig. 32) s'en déduira, en écrivant :

$$F_2^2 = R^2 - F_1^2$$

(propriété du triangle rectangle).

Les forces agissent donc toujours sur un point ou sur un corps matériel, comme si elles étaient *indépendantes*, mais leurs effets s'ajoutent *algebraiquement*, car, suivant le sens, ces effets sont additifs ou soustractifs (*Principe de l'Indépendance des forces*).

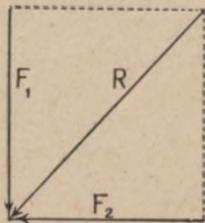


FIG. 32.

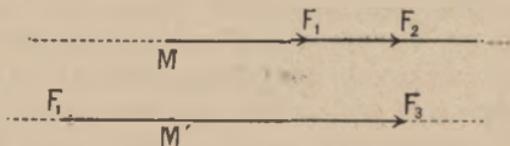


FIG. 33.

Ainsi la résultante des forces qui agissent sur  $M$  est la

somme ( $F_1 + F_2$ ) (fig. 33) toutes deux appliquées au point M; la résultante qui agit au point M' sera la différence ( $F_3 - F_1$ ).

15. **Équilibre des forces : statique.** — Deux forces opposées et égales, c'est-à-dire de même intensité, ne déplacent pas le point où elles sont appliquées. On dit qu'elles se font *équilibre*, leur résultante est évidemment *nulle*. Que trois ou plusieurs forces soient appliquées au même point, il faut et il suffit, pour que ce point soit en *équilibre*, que la résultante soit nulle, ou, ce qui revient au même, que les composantes suivant trois axes rectangulaires soient nulles. Remarquons que par *équilibre* il faut entendre ceci : le point M restera au repos s'il était au repos avant l'application des forces; il conservera son mouvement uniforme s'il était en mouvement; en un mot, le point sera *libre* après comme avant.

Mais il y a lieu de se rappeler que les forces produisent des *déformations*, très visibles par exemple sur un fil de caoutchouc, moins sensibles sur une pièce de métal, mais toujours réelles; chaque déformation crée une force *directement opposée* à celle qui l'a produite; c'est le *principe de l'action égale à la réaction*. Ainsi un ressort se déforme quand on le tire, et il se développe une réaction qui le ramène à son état initial quand on a cessé de tirer.

Nous devons donc distinguer l'*équilibre théorique*, où n'existe aucune réaction, de l'*équilibre naturel* qui est essentiellement un *équilibre contraint*. La statique d'un corps solide néglige, méthodiquement, les déformations qu'il subit, ou la *résistance* de la matière qui le constitue. Elle passe, ensuite, du solide *parfait* au solide *réel* qui est déformable.

16. **Liaisons et frottements.** — Le point et le système matériels absolument libres sont des fictions; ainsi l'extrémité d'un pendule représenterait, si l'on veut, un point, mais dans tous ses déplacements ce point est limité par la longueur invariable du fil; c'est un point soumis à une *liaison*. De même aussi un point peut être astreint à se déplacer sur une surface, comme une bille qui roule; un solide peut également être *lié* ou *géné* de façon à ne pouvoir que tourner autour d'un *axe* ou glisser suivant cet *axe*. Il y a ainsi des

modes de *liaisons* variés, et les liaisons reviennent à des *conditions* que le système doit remplir. Les liaisons sont remplaçables par des forces, car la surface qui oppose partout sa réaction à la bille et l'oblige à se mouvoir sur elle peut

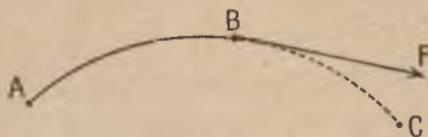


FIG. 34.

être remplacée par une force égale à cette réaction ; la tension d'un fil ABC sera suppléée par la force BF, si on coupe le fil en B et détruit par là une liaison (fig. 34).

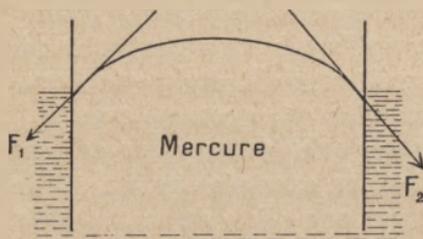


FIG. 35.

La surface des liquides apparaît comme une membrane tendue par des forces tangentielles  $F_1, F_2, \dots$  remplaçant les liaisons détruites par la paroi. C'est ce que l'on appelle la *tension superficielle des liquides* (fig. 35).

La matière vivante, ou *Protoplasma*, a une tension superficielle qui lui assure une certaine *autonomie* au milieu des liquides de l'organisme. En

somme, les liaisons créent des forces, limitent les déplacements ; ces derniers doivent être *compatibles* avec les liaisons pour être possibles. Il faut aussi considérer que les liaisons peuvent être *sans frottement* ou *avec frottement* suivant que la surface n'oppose pas ou, au contraire, oppose une *résistance* au déplacement du point matériel ; cette résistance sera examinée plus loin (§ 41) ; il importe, en tout cas, de n'en pas faire abstraction et de s'assurer que *les frottements sont des forces*. En effet, soit une force  $F$  appliquée au point mobile  $M$  qui se déplace sur la courbe  $S$  (fig. 36) ; on peut décomposer  $F$  en une *composante normale*  $MN$  qui exerce une *pression* sur la surface et se trouve neutralisée par la réaction de celle-ci ; et une *composante tangentielle*  $MT$  qui produira le mouvement du point  $M$ . Or l'expérience montre que, jusqu'à une certaine valeur de  $MT$ , le mouvement ne se produit pas ; cette valeur est celle du *frottement*

à la surface ; c'est donc une force, une résistance au mouvement.

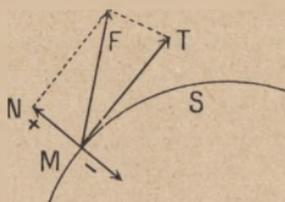


FIG. 36.

En définitive, les divers points d'un solide sont sujets à des liaisons, à des frottements, et si on se souvient qu'il est toujours déformable, à des liaisons qualifiées de *forces intérieures*, par opposition aux *forces extérieures*. L'équilibre exige que la résultante de toutes ces forces soit nulle. Cette condition est nécessaire et suffisante ; autrement des forces extérieures à résultante nulle pourraient rompre un corps dont les forces intérieures n'ont pas de résultante également nulle.

**17. Réduction d'un système de forces.** — On peut réduire le nombre des forces appliquées à un solide ; car on ne

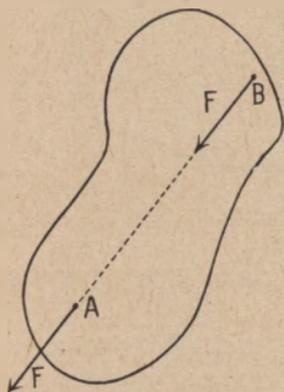


FIG. 37.

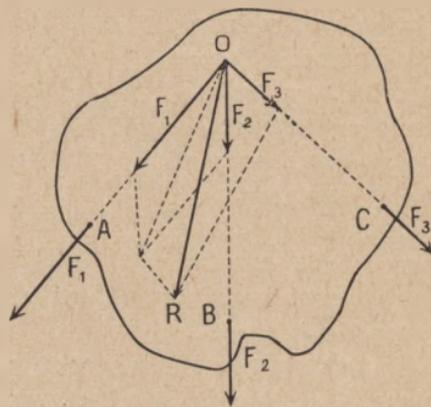


FIG. 38.

change pas l'intensité d'une force si on la transporte, dans sa propre direction, d'un point à l'autre du solide, de A en B, par exemple (fig. 37), et il est possible de transporter plu-

sieurs *forces concourantes* au point où elles concourent de manière à les remplacer par leur résultante unique OR (fig. 38). Cette résultante doit être nulle dans le cas d'équilibre, c'est-à-dire que ses composantes rectangulaires X, Y et Z doivent satisfaire à la condition :

$$X = 0, \quad Y = 0, \quad Z = 0,$$

soient trois équations.

Mais le système de forces peut n'être pas concourant; les unes sont concourantes au point O, les autres non; dans ce cas, on mène par le point O des forces égales et parallèles, et de même sens que les forces non concourantes; le nouveau système aura une *résultante générale par rapport au point O*; toutefois les forces non concourantes, telles que  $F_4$  et  $F_5$ , tendent à produire le mouvement du solide autour du point O; elles ont un *moment* (de *movementum*) par rapport à O. Il y a donc, en outre de la résultante générale, un moment de chacune des forces (fig. 39), ou un *moment résultant* de toutes ces forces si on les compose.

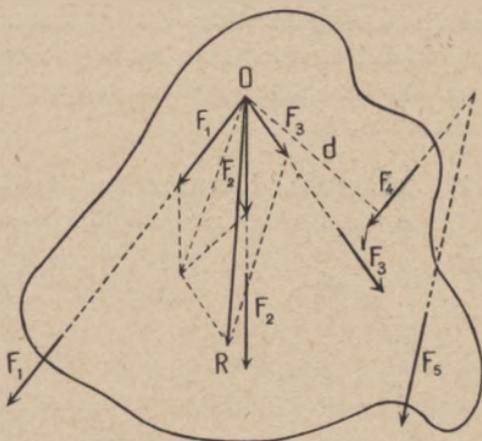


FIG. 39.

Le moment d'une force, telle que  $F_4$ , par rapport à un point O, est le produit de cette force par sa distance  $d$  à ce point.

On voit que par son moment la force tend à faire tourner le corps autour du point O, ou d'un axe qui y passerait, avec un rayon ou *bras de levier* égal à  $d$ .

En décomposant le moment résultant suivant les trois axes rectangulaires, la condition d'équilibre exige que les trois composantes L, M et N du moment soient nulles,

soient les trois équations :

$$L = 0, \quad M = 0, \quad N = 0.$$

La réduction d'un système de forces à une résultante générale et un moment résultant montre que l'équilibre d'un solide exige six conditions, six équations.

18. Cas des forces parallèles. — Lorsque deux forces  $F_1$  et  $F_2$ , de concourantes deviennent parallèles (fig. 40), le point de concours se trouve rejeté à l'infini et la résultante

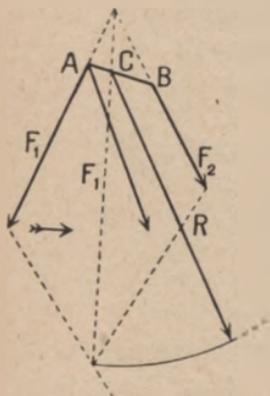


FIG. 40.

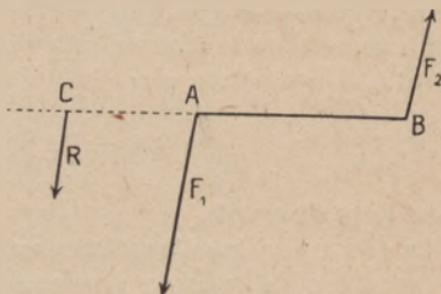


FIG. 41.

tante sera appliquée en un point de la droite AB, qui joint les points d'application de  $F_1$  et  $F_2$ . Cette résultante sera égale à la somme des deux forces si elles ont le même sens, à leur différence si elles sont *inegales* et de sens contraire (fig. 41);

elle aura une direction parallèle à la leur et elle partagera la droite AB en segments inversement proportionnels à ces forces. Ainsi on a :

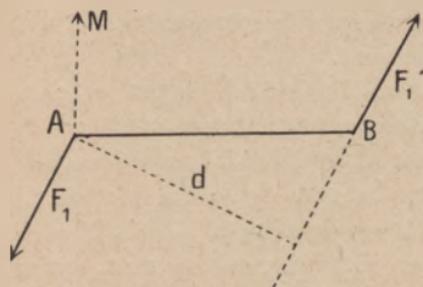


FIG. 42.

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{CB}{CA}.$$

Le point C est dit le *centre des forces parallèles*.

Si les deux forces sont *égales* et de *sens contraires*, leur résultante est nulle :  $F_1 = F_1'$  et  $F_1 - F_1' = 0$  (fig. 42); on dit

qu'elles forment un *couple*. Le couple tend à produire un mouvement de rotation; il possède un *moment*. Et l'on s'aperçoit aisément que le moment de  $F_1'$  par rapport au point A est :

$$F_1' \times d.$$

Celui de  $F_2$  par rapport au même point A est nul : de sorte que le moment du couple est le produit de l'une des deux forces par leur distance mutuelle  $d$ , leur *bras de levier*.

Ce moment est manifeste quand, par exemple, deux chevaux sont attelés à un manège; c'est encore celui de la tarière, du tire-bouchon.

On représente le moment par un vecteur AM appliqué au point A et normal au plan du couple; on a :

$$AM = F_1' \times d;$$

c'est l'*axe du couple*.

La décomposition d'une force en deux forces parallèles, la composition de trois ou plusieurs forces sont des notions très simples; elles s'expliquent par ce qui a été dit plus haut.

Si, maintenant, nous remarquons que l'ensemble des forces appliquées à un solide ont une résultante générale R et un moment résultant  $\mathcal{M}$ , et que, d'autre part, ce moment revient à un couple, nous sommes conduit à dire que :

*Les forces d'un système se ramènent à une force unique et à un couple, ou à une force et un moment.*

En nous plaçant dans des conditions de déplacement compatibles avec les liaisons du solide, nous dirons aussi :

Il faut six équations pour exprimer l'équilibre d'un solide, pour représenter que les composantes de sa translation (X, Y et Z) et celles de son moment ou de sa rotation (L, M et N) sont séparément nulles, pour signifier, en un mot, qu'un *corps solide entièrement libre possède six degrés de liberté*. Ainsi, un point mobile sur une surface n'a que des translations suivant X et Y, soient *deux degrés de liberté*; une bicyclette a *trois degrés de liberté*.

19. Applications. — 1° Répartition des forces. — Etant donnée une force verticale  $F$ , celle de la pesanteur par exemple, on peut la répartir en deux forces égales appliquées aux points A et B. D'après ce que nous savons, les points A et B devront être équidistants de M (voir aussi § 20) (fig. 43).

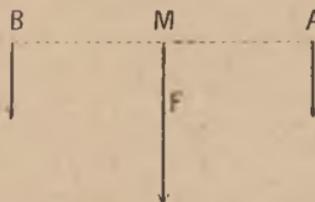


FIG. 43.

Si l'on doit répartir une force  $F$  entre trois points A, B, C, on construira le triangle ABC, puis, joignant AM, on décomposera  $F$  en  $F_1$  et  $F_2$  parallèles ; il restera à décomposer  $F_2$  en  $F_3$  et  $F_4$  pour avoir la répartition en trois forces  $F_1, F_3, F_4$  que l'on cherchait (fig. 44). Ces trois forces seraient égales si le triangle construit était équilatéral. Le premier cas est celui d'un tricycle, par exemple ; le deuxième est celui de la plupart des « pieds à trois branches » des instruments de physique.

Si l'on doit répartir une force  $F$  entre trois points A, B, C, on construira le triangle ABC, puis,

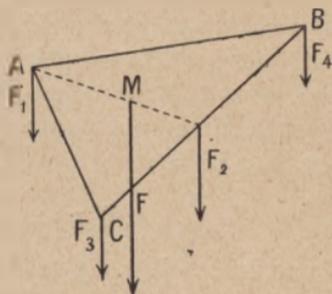


FIG. 44.

La répartition entre quatre points — comme suivant les quatre pieds d'une table — est théoriquement *indéterminée*, attendu que, sur un terrain où la résistance varie d'un point à un autre, deux pieds pourraient seuls supporter tout l'effort. Pratiquement, il y aurait à tenir compte du fléchissement des pieds, du terrain, ce qui *lève l'indétermination*.

2° Degrés de liberté. — Les liaisons des corps solides ou leur degré de liberté permettent de se rendre compte de leur mouvement ; nous en verrons de nombreux exemples au sujet des *articulations* du corps de l'homme.

20. Masse. — On dit que deux corps possèdent la même *masse* lorsque, sous l'action de forces égales, ils prennent une même accélération. Si leur accélération est différente, la plus grande correspond le corps de plus petite masse ; en

termes généraux, la masse est proportionnelle à l'accélération, et on écrira :

$$\frac{F}{m} = \gamma, \quad \frac{F}{m'} = \gamma', \quad \frac{F}{m''} = \gamma'', \quad \dots,$$

ou bien :

$$\frac{m}{m'} = \frac{\gamma'}{\gamma}; \quad \frac{m'}{m''} = \frac{\gamma''}{\gamma'}; \quad \dots;$$

et aussi pour des forces  $F$  et  $F'$  produisant la même accélération  $\gamma$  sur des masses  $m$  et  $m'$  :

$$\frac{F}{m} = \gamma; \quad \frac{F'}{m'} = \gamma; \quad \text{d'où}; \quad \frac{F}{F'} = \frac{m}{m'}, \text{ etc.}$$

Il s'ensuit que  $F = m\gamma$ , c'est-à-dire : La force est le produit de la masse par l'accélération ; et ce produit peut lui servir de *mesure*. L'intensité de la pesanteur, qui est une force aussi, revient à :  $P = mg$ , en désignant par  $P$  le *poids* d'un corps. En un même lieu, l'accélération de la gravité est constante ; on aura :

$$P' = m'g, \quad P'' = m''g.$$

Donc les poids sont entre eux comme les masses :

$$\frac{P}{P'} = \frac{m}{m'}, \quad \dots$$

Dans la relation  $P = mg$ , si on choisit l'*unité de masse*,  $m = 1$ , on aura  $P = g$ , et l'intensité de la pesanteur sera celle de l'accélération. On désigne  $g$ , pour cela, sous le nom d'intensité de la pesanteur. A Paris,  $g = 9^m,80978$  ou  $9^m,81$  environ. Nous avons dit, en effet, que  $g$  varie avec la latitude du lieu (en augmentant) et avec l'altitude (en diminuant) ; on peut négliger ici ces variations. L'unité de masse est la masse du centimètre cube d'eau distillée à la température de  $4^\circ$  centigrades ; on la nomme *gramme* ; plus exactement, l'unité de masse est la millième partie du *kilogramme-étalon* conservé aux Archives nationales.

On prend, d'autre part, comme *unité de longueur*, pour les vitesses, les accélérations, etc., le *centimètre*, ou la centième partie du *mètre* conservé aux Archives.

Il s'ensuit que la force ou le poids :  $p = mg$ , sera :

$$p = 1^{\text{re}} \times 980^{\text{cm}},97 = 980,97 \text{ grammes-centimètres.}$$

L'unité de poids, dans ce système gramme-centimètre, sera

donc le gramme-centimètre ou la *dyne* ; c'est la fraction  $\frac{1}{9}$  ou  $\frac{1}{981}$  du gramme. En un lieu donné, la valeur de  $g$  étant constante, on comparera les forces par les masses, et le gramme sera l'unité de *force* ou de *poids*. Les usages industriels adoptent le *kilogramme*, qui vaut 1.000 grammes.

A ces deux unités *fondamentales*, le centimètre (C) et le gramme (G), ajoutons l'unité de temps, la *seconde* (S), et nous avons le système C. G. S. qui tend, aujourd'hui, à devenir universel. (Il fut adopté dès le Congrès de 1881, tenu à Paris.)

La définition  $F = mg$  ou  $m\gamma$ , que nous avons donnée de la force, est à rapprocher de celle qui figure plus haut (§ 13) ; l'une est *dynamique*, l'autre *statique*. Quant à la masse, elle n'implique aucune notion ni physique ni métaphysique ; si l'on définissait la masse par la *quantité de matière*, il resterait à prouver que la *nature* de cette matière ne modifie pas la valeur de la masse. Newton le comprit si bien qu'il en fit la vérification sur les corps organisés. Il est autrement correct de dire : *La masse, c'est l'inertie* (§ 13), puisque l'inertie ne signifie pas exclusivement le repos, mais la persistance dans un état de repos ou de mouvement. La routine serait, si l'on veut, de l'*inertie intellectuelle*.

La vitesse et l'accélération se communiquant aux corps en un temps *fini*, l'inertie peut se faire sentir ; ses effets sont d'ailleurs très connus : un voyageur qui descend d'une voiture en marche tombe parce que le haut de son corps a conservé le mouvement de celle-ci ; à l'arrêt d'un train, d'un bateau, d'un cheval, on tend également à tomber. Comme effets utiles, citons l'ouvrier qui frappe sur le derrière d'une varlope pour en extraire le ciseau ; le ciseau a résisté par son inertie. De même, on emmanche un marteau en frappant la queue du manche sur une table ; on arrache les clous, les boulons par des coups convenablement donnés sur les pièces, etc.

L'*instantanéité* de la vitesse n'étant pas réelle, il n'existe pas non plus de *forces instantanées* ; mais une force peut agir en un temps extrêmement court : c'est ce qui a lieu dans le *choc* (§ 42).

21. La plus petite masse d'un corps qui ait les propriétés de la matière est la masse de la *molécule*. Une molécule n'est

pas nécessairement *simple*, indivisible; elle peut se composer d'*atomes*, théoriquement « insécables ». Les propriétés de la matière sont généralement en rapport avec sa molécule.

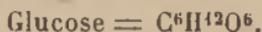
Analysant la constitution de la molécule, la *chimie* établit que celle-ci se compose d'un *seul atome* dans le cas du mercure, de *deux* dans celui de l'oxygène, etc. Les *symboles* sont: Hg pour l'un, O<sup>2</sup> pour l'autre. Les molécules peuvent se *condenser* et passer de l'état gazeux aux états liquide et solide.

Les corps *composés*, acides, bases, sels, etc., ont des molécules très grosses et *polyatomiques*. C'est dans les *substances organiques* que se rencontrent les édifices moléculaires les plus complexes: tel est le cas de l'albumine (blanc d'œuf).

Le poids d'une molécule est la somme des poids des atomes qui la constituent. En prenant pour poids atomique de l'hydrogène H = 1 gramme, on a déterminé les poids atomiques de tous les éléments. Exemples:

|                              |   |                          |
|------------------------------|---|--------------------------|
| H = 1 (hydrogène).           | } | S = 32 (soufre).         |
| O = 16 (oxygène).            |   | C = 12 (carbone).        |
| N = 14 (azote ou nitrogène). |   | P = 31 (phosphore), etc. |

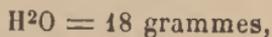
Soit la molécule de sucre de raisin ou *glucose*. Elle comprend 6 atomes de carbone, 6 d'oxygène et 12 d'hydrogène. On la représentera donc ainsi:



Le poids moléculaire sera:

$$(12 \times 6) + (1 \times 12) + (16 \times 6) = 180 \text{ grammes.}$$

La molécule d'eau est:



et ainsi de suite.

Chose remarquable, les propriétés biologiques de la molécule dépendent non seulement de sa *nature*, mais aussi de sa *forme*. Ainsi tel microbe fera fermenter un sucre où les atomes ont une disposition déterminée; il n'en fera pas fer-

menter un autre de même composition et de même poids moléculaire, si les atomes s'y trouvent disposés différemment.

L'influence de la structure moléculaire (*stéréochimie*) sur les opérations physiologiques est encore un problème obscur.

Quant à la réalité de la molécule, des travaux récents permettent de ne plus en douter. Des évaluations de M. Jean Perrin <sup>(1)</sup> il résulte que 1 gramme de glucose contiendrait 100 milliards de milliards ( $10^{20}$ ) de molécules *vraies*.

**22. Centre de masse ou de gravité.** — On appelle *centre de masse* un point du corps où toute sa masse pourrait être supposée réunie. Plus précisément, si on compose toutes les forces qui représentent les effets de la pesanteur sur les molécules du corps, leur résultante GR sera appliquée au centre de masse qui sera, de ce fait, la *centre de gravité* G (fig. 45).

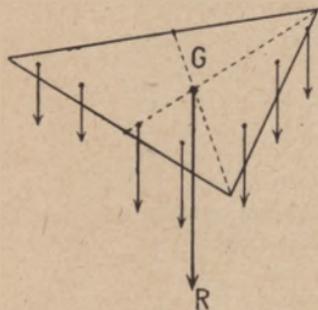


FIG. 45.

La position du centre de gravité ne dépend que de la *forme* du corps et de la *répartition de sa matière* à un instant donné; elle ne dépendra que de la forme si les corps sont *homogènes*, c'est-

à-dire de structure semblable en tous leurs points. Mais c'est un cas relativement rare, et, pour les corps *hétérogènes*, la détermination du centre de gravité est chose expérimentale.

La verticale qui traverse un corps en son centre de gravité sera l'*axe de gravité*; un axe pareil jouit de propriétés particulières (§ 43); on dit aussi « *ligne de gravité* ».

Le centre de gravité des corps homogènes est leur *centre de figure*, quand il y en a; celui d'une surface (parallélogramme, rectangle) est le point où les diagonales se coupent; celui des triangles (fig. ci-dessus) est à l'entrecroisement des diagonales; celui d'une circonférence ou d'un anneau est à leur centre, et, en

<sup>(1)</sup> Jean Perrin (*Journal de physique*, 1910, p. 10; *Revue scientifique*, 1911, p. 774). *Les Atomes*, 12<sup>e</sup> mille; Paris, 1921.

général, si l'on découpe une surface quelconque en triangles, on aura des centres de gravité dont les axes admettront une même résultante.

Les solides, ayant pour sections les surfaces précédentes, admettent les mêmes axes de gravité, sur lesquels, à

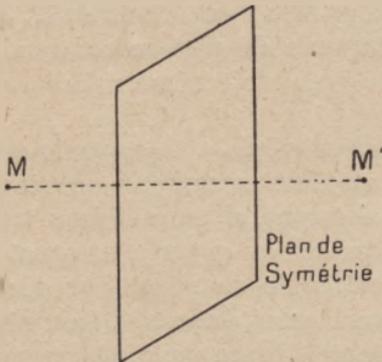


FIG. 46.

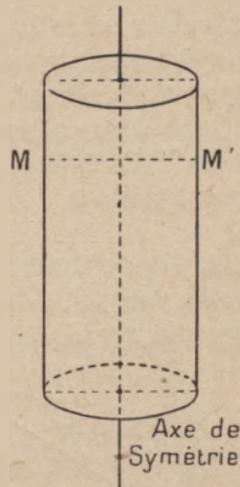


FIG. 47.

égale distance des deux faces, se trouvent les centres de gravité.

Le poids d'un triangle de fer, 60 kilogrammes par exemple, étant supposé au centre G, trois ouvriers soutenant les sommets supporteront chacun 20 kilogrammes.

La position du centre de gravité doit être cherchée sur le plan ou sur l'axe de *symétrie* d'un corps, quand il y en a, et il y en a lorsque deux points équidistants du corps se trouvent sur la perpendiculaire à ce plan ou à cet axe (fig. 46 et 47). Mais le centre de gravité peut se rencontrer sur un plan, appelé *plan diamétral*, toutes les fois que ce plan partage en deux moitiés égales les obliques parallèles qui le traversent. Ainsi, dans un prisme, le plan qui coupe les arêtes en leurs milieux est un plan diamétral (fig. 48).

On démontre (voir traités de géométrie ou de statique) que :

1° Le centre de gravité d'un prisme quelconque est au milieu de la droite qui joint les centres de gravité de ses deux bases B et B' ; de même pour un cylindre ;

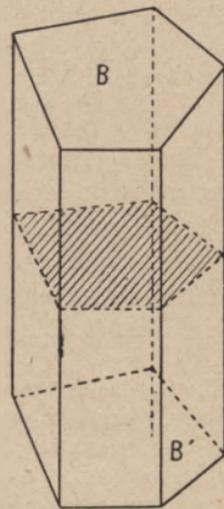


FIG. 48.

2° Le centre de gravité d'une pyramide est au *quart* de la droite qui joint le sommet au centre de gravité de la base, et à partir de celle-ci; de même pour un cône.

Tout ce qui vient d'être dit concerne les corps homogènes.

La recherche expérimentale du centre de gravité dans les corps quelconques peut se faire comme suit :

1° Le corps est suspendu successivement par deux de ses points; les deux directions de la corde se couperont au centre de gravité;

2° On placera le corps sur le bord d'une table ou sur l'arête d'un fort couteau; en le disposant dans deux directions successives différentes, celles-ci se couperont en son centre de gravité; sur l'arête il devra pencher également de chaque côté, c'est-à-dire observer l'équilibre;

3° S'agit-il d'un corps formé de parties diverses, on pourra chercher le centre de gravité de chacune d'elles et composer les forces de gravité entre elles. Ainsi, pour une halète à sphères égales, on composera  $p$ ,  $p$  et  $p'$  en

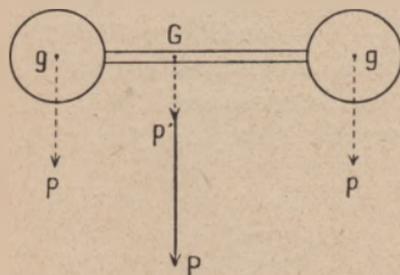


FIG. 49.

une force  $P$  placée au milieu de la barre si celle-ci est homogène, en un autre point si elle est hétérogène (cas de la figure 49); le point  $G$  s'obtient par la méthode ordinaire de composition des forces parallèles.

Pour des parties de poids  $P_1, P_2, P_3, P_4$ , reliées entre elles par des pièces rigides (dont nous négligerons ici le poids), nous aurons ceci : les pièces de 1 et 3 kilogrammes (fig. 50) ont une résultante

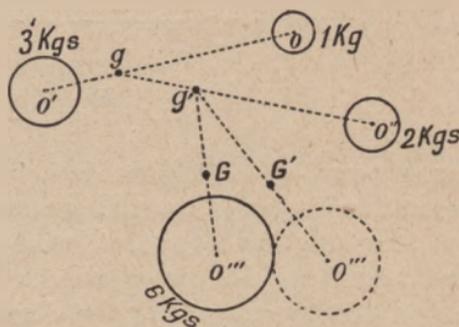


FIG. 50.

au quart de  $OO'$ , en  $g$ ; cette résultante de 4 kilogrammes et la pièce de 2 kilogrammes ont une résultante de 6 kilogrammes placée au tiers de  $gO'$ , en  $g'$ ; enfin ces 6 kilogrammes se composent avec le poids de 6 kilogrammes de la quatrième pièce, et la résultante finale sera en  $G$ , au milieu de  $O'O''$ ; elle équivaudra à 12 kilogrammes.

Le système de pièces ne devra pas, s'il est articulé aux points  $O, O', O'', O'''$ , changer de forme pendant la détermination; le centre de gravité général est relatif à une *position invariable* des pièces dont on a trouvé les centres de gravité particuliers. Il suffit, en effet, que le corps  $O''$  se déplace (pointillé) pour que le centre  $G$  se déplace à son tour dans l'espace (en  $G'$ ).

**23. Stabilité de l'équilibre.** — Les conditions d'équilibre que l'on rencontre fréquemment sont relatives aux effets de la pesanteur et de la réaction que le corps subit de la part de son support. Un corps, suspendu à un *point fixe*, pèsera

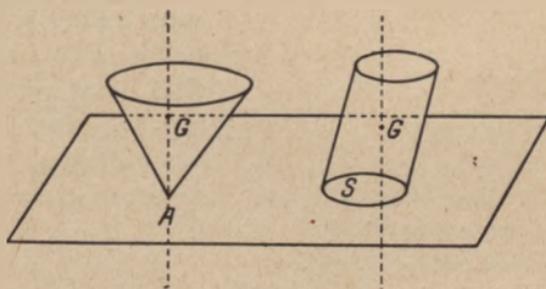


FIG. 51.

sur ce point, et la réaction de celui-ci détruira l'effet de la pesanteur. Un corps, tournant autour d'un *axe fixe*, exercera des pressions sur cet axe, et les réactions de celui-ci leur feront équilibre. Un corps, posé sur un plan, devra avoir son axe de gravité passant au point d'appui  $A$  ou à travers le *plan d'appui*  $S$  (fig. 51). A cette base d'appui on donne le nom de *base de sustentation*.

Si nous inclinons un corps tout en le laissant au contact de sa base d'appui, son centre de gravité se déplacera; il

pourra s'élever ou s'abaisser ; il est aisé de voir (fig. 52) que

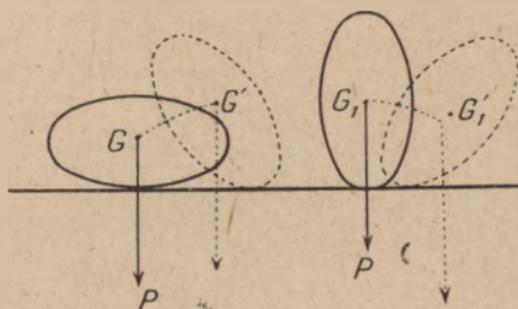


FIG. 52.

l'équilibre est le plus stable lorsque ce centre de gravité est le plus bas possible ; et instable ( $G_1$ ) quand ce centre est le plus haut possible. Mais une sphère qui roule sur un plan horizontal possède un centre de

gravité toujours à la même distance de ce plan : l'équilibre est dit, dans ce cas, *indifférent*.

Il ne suffit pas que l'axe de gravité rencontre la base d'appui pour que l'équilibre soit le plus stable ; il faut que le centre de gravité soit à la distance minimum de cette base. Mais il est clair que, de toutes façons, c'est une condition

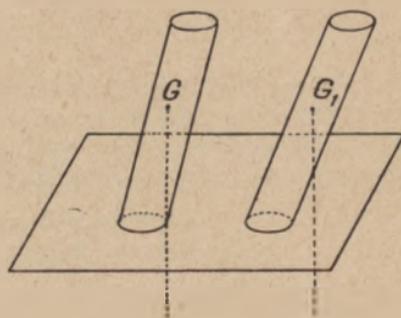


FIG. 53.

nécessaire — et elle est suffisante — que l'axe de gravité touche à l'intérieur de la surface de sustentation, pour éviter la chute, le renversement du corps (fig. 53).

24. La stabilité d'un édifice matériel dépend et de la grandeur de sa base de sustentation et de la faible hauteur de son centre de gravité ; soumis à une force latérale, qui tend à le renverser, il y résiste en vertu de son épaisseur dans la direction de cette force et grâce à son poids. Soit un mur vertical, d'épaisseur  $e$  dans la direction où une force horizontale  $H$  tend à le renverser autour de son arête  $AA'$  (fig. 54). Le moment  $\pi$  de cette force, par rapport au point B, est le produit :

$$\pi = H \times BC \text{ (voir } \S 18).$$

Examinons la section BCDE (fig. 55), comme si elle représentait

a projection de tout le mur (le mur vu de profil). On a :

$$\pi = H \times EI.$$

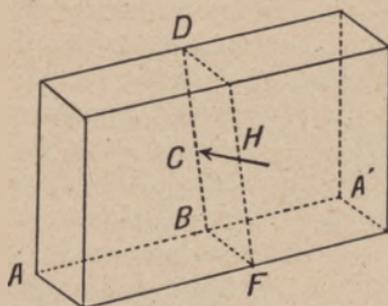


FIG. 54.

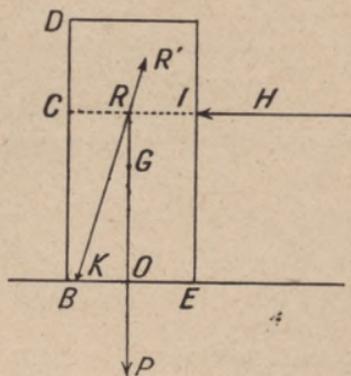


FIG. 55.

Or, la force  $H$  et le poids  $P$  du mur ont une résultante dirigée suivant  $RK$ , et la réaction du sol lui est égale et opposée dans la direction  $KR'$ ; cette réaction, appliquée au point  $K$ , a un moment nul par rapport à ce point. Mais  $H$  et  $P$  ont les moments suivants :

$$\text{Moment de } H = H \times EI.$$

$$\text{Moment de } P = P \times KO.$$

Pour que ces deux moments soient égaux, il faut :

$$H \times EI = P \times KO, \quad \text{ou} \quad KO = EI \times \frac{H}{P}.$$

A mesure que la force horizontale  $H$  augmente,  $KO$  devra augmenter; la limite sera  $KO = OB$ , demi-épaisseur du mur; donc :

$$OB = EI \times \frac{H'}{P};$$

l'effort horizontal maximum  $H'$  sera :

$$H' = P \times \frac{OB}{EI}.$$

Le moment maximum  $\pi = H' \times EI$  est le *moment de stabilité* du mur. On voit que  $\pi = P \times OB$  ou  $\frac{P \times e}{2}$ , c'est-à-dire le produit du poids par la demi-épaisseur du mur, ou le produit du poids par la distance de l'axe de gravité.

Comme application, le corps humain offre plus de stabilité dans le *plan latéral* que dans le plan antéro-postérieur ou médian.

## CHAPITRE II

### NOTIONS DE MÉCANIQUE GÉNÉRALE (suite) ÉTUDE DES FORCES. — DYNAMIQUE

**25. Définition.** — La *dynamique* étudie le mouvement que des forces données déterminent, et, réciproquement, les forces qui doivent agir pour produire un certain mouvement.

En s'occupant du point matériel, on ramènera les forces agissantes à leur seule résultante ; et dans le cas plus réel de systèmes matériels, on supposera toute la masse réunie au centre de gravité et les forces ou leur résultante agissant en ce centre. Pour simplifier, on fait encore abstraction des frottements. et en particulier de la résistance que l'air oppose au mouvement des corps (voir § 44).

**26. Mouvement d'un point. Projectiles.** — Lorsqu'une force, constante en grandeur et en direction, agit sur un point M, le mouvement est (§ 2) :

$$e = \frac{1}{2} \gamma t^2, \quad \text{et la vitesse : } v = \gamma t.$$

C'est le cas d'un corps qui *était en repos* et qui tomberait sous l'action de la pesanteur. Alors :

$$e = \frac{1}{2} g t^2 \quad \text{et} \quad v = g t.$$

D'où l'on déduit :

$$v^2 = g^2 t^2 = 2g \times \frac{1}{2} g t^2 = 2ge.$$

Donc :

$$v = \sqrt{2ge}.$$

La hauteur de chute  $e$  se désigne généralement par  $h$ , et l'on écrit :

$$v = \sqrt{2gh}.$$

On a aussi :

$$h = \frac{v^2}{2g}.$$

Mais si le point avait déjà un mouvement uniforme, il y aurait un mouvement résultant. C'est ce que nous avons vu, par exemple, dans la chute d'un corps animé d'une vitesse horizontale; c'est le mouvement des projectiles. Soit

un point  $M$  ayant une vitesse  $v$  suivant  $XX'$  et sollicité par la pesanteur suivant  $YY'$  (fig. 56); nous savons qu'il décrira

une parabole (§ 5). En effet, au temps  $t$ , le parcours sera  $vt$  sur  $XX'$ ,  $\frac{1}{2}gt^2$  sur  $YY'$ ; le parallélogramme de ces mouvements donnera, en fonction du temps, la trajectoire cherchée.

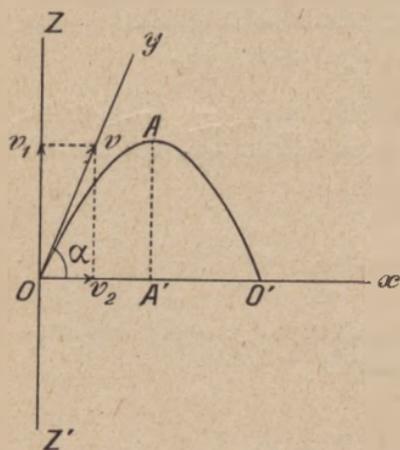


FIG. 57.

s'ajoutera algébriquement à la vitesse de chute suivant  $ZZ'$ , et une vitesse horizontale  $v_2 = v \cos \alpha$ . Donc, la vitesse verticale sera :

$$V = v \sin \alpha - gt$$

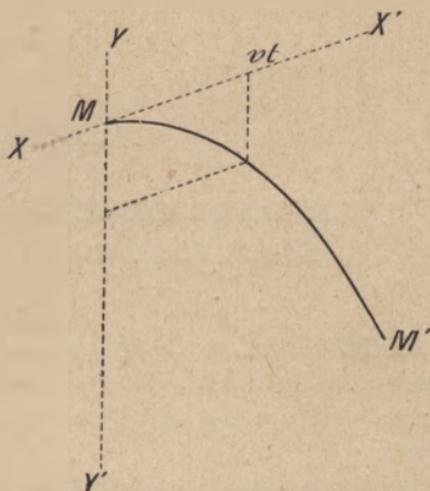


FIG. 56.

à l'instant  $t$ , et l'espace parcouru :

$$Z = (v \sin \alpha) t - \frac{1}{2} g t^2.$$

Et suivant  $Ox$ , la vitesse et le parcours seront

$$v_x = v \cos \alpha \quad \text{et} \quad x = (v \cos \alpha) t.$$

En effectuant, on trouve :

$$Z = x \operatorname{tang} \alpha - \frac{g}{2v^2 \cos^2 \alpha} x^2.$$

C'est l'équation d'une parabole ayant son axe  $AA'$  vertical.

Quand le projectile est au point A, sa vitesse  $V = v \sin \alpha - gt$  est devenue égale à zéro; par suite :

$$v \sin \alpha - gt = 0 \quad \text{et} \quad t = \frac{v \sin \alpha}{g}.$$

On a ainsi la durée  $t$  de l'ascension; il en faut autant pour la descente, de sorte que la durée totale est  $\frac{2v \sin \alpha}{g}$  et correspond à la portée  $OO'$  du projectile ou à l'amplitude du jet. L'équation de l'espace  $OO'$  sera donc :

$$v_x \times 2t \quad \text{ou} \quad v \cos \alpha \times \frac{2v \sin \alpha}{g} = \frac{2v^2 \sin \alpha \cos \alpha}{g} = \frac{v^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

La plus grande portée ou l'amplitude maximum a lieu pour  $\sin 2\alpha = 1$ , ou  $2\alpha = 90^\circ$  et  $\alpha = 45^\circ$ : il faut donc tirer sous l'angle de  $45^\circ$ . Dans l'équation générale de  $Z$ , si l'on se donne  $x$  (point où l'on veut que le projectile atteigne) et  $v$  la vitesse oblique, on pourra calculer l'angle sous lequel on devra lancer le projectile.

Il n'y a pas d'utilité à compléter ici ce problème du tir; mais on notera que la trajectoire est modifiée par la résistance de l'air, et que cela diminue l'amplitude du jet (voir aussi § 274).

**27. Force centrale.** — La pesanteur est un exemple de ce que l'on appelle *forces centrales*, car la Terre attire les corps comme si elle était un point central, et elle-même est attirée par le Soleil, centre de notre monde. La direction d'une force centrale passe toujours par le centre; mais la force peut être *attractive* ou *répulsive*, et agir suivant la distance au mobile ou le carré de cette distance. La gravitation universelle conduit à un mouvement des astres figuré par des *ellipses*; mais dans les limites où on l'étudie, cette attraction est sensiblement verticale pour la terre et conduit à la parabole.

Réciproquement, le mouvement ou la trajectoire étant connu, on détermine la force. Prenons le cas d'un mobile assujéti à décrire une *circonférence* de centre  $O$ , et cherchons quelle sera cette force centrale. Nous supposons la vitesse angulaire  $\omega$  constante. Or, la force cherchée doit être  $F = m\gamma$ , et l'accélération  $\gamma$  est ici constante. Il convient de remarquer que, dans un mouvement *varié*, curviligne, cette accélération a deux composantes. En effet, quand le mobile va de  $M$  en  $M'$ , la vitesse passe de  $v$  à  $v + dv$ ,  $dv$  étant l'accroissement dans le temps infiniment petit  $dt$ , et l'angle  $MOM'$  sera  $d\alpha$ . Menons  $M'A$  égal et parallèle à  $v$ .

L'accélération est représentée par  $\frac{AB}{dt}$ . Comme  $AB$  est la résultante des vecteurs rectangulaires  $BC$  et  $AC$ , on peut dire que

l'accélération  $\frac{AB}{dt}$  est la somme d'une

accélération tangentielle  $\frac{BC}{dt}$ , et d'une

accélération centripète  $\frac{AC}{dt}$ . Et l'on

n'a pas de peine à voir que la première est

égale à  $\frac{dv}{dt}$ , comme nous

l'avons déjà indiqué (§2),

tandis que la seconde

est  $\frac{v^2}{R}$ ,  $R$  étant le rayon de courbure en  $M'$ ; car

$$AC = v d\alpha, \quad \text{et} \quad \frac{AC}{dt} = v \frac{d\alpha}{dt},$$

d'autre part  $\frac{d\alpha}{dt} = \frac{v}{R}$ ; donc :  $\frac{AC}{dt} = \frac{v^2}{R}$  (fig. 58).

Quand le mobile doit décrire une circonférence d'un mouvement uniforme, l'accélération tangentielle est nulle, et l'on doit considérer la seule accélération centripète; donc :

$$\gamma = \frac{v^2}{R};$$

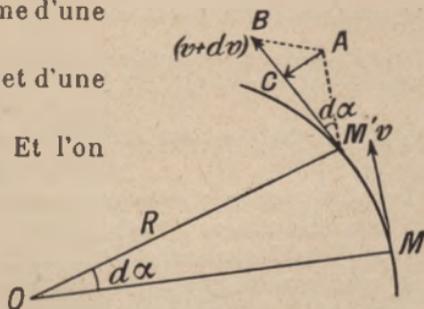


FIG. 58.

La force centripète sera :

$$F = m\gamma = m \frac{v^2}{R}$$

En fait, cette force est une réaction ; si on matérialise le mobile (pierre dans une fronde), on verra qu'il tire sur le rayon OM (sur la corde) et y crée une réaction (*tension*) ; la force de traction ainsi manifestée, c'est la *force centrifuge*, égale à la force centripète (fig. 59).

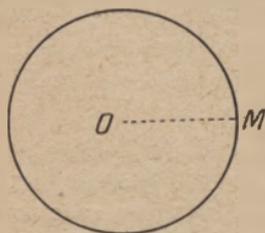


FIG. 59.

La force centrifuge qui apparaît dans les mouvements de rotation rapide amène la rupture des volants, des meules ; elle oblige l'écuyer de cirque à se pencher vers l'intérieur de la piste, les rails à être surhaussés à l'extérieur dans les courbes (*dévers de la voie*) ; elle explique le rôle des *esso-reuses*, des *turbines de sucrerie*, du simple *panier à salade*, et certains tours d'acrobatie (telle la piste « en boucle » que parcourt un cycliste).

**28. Pendule.** — Le pendule est un point matériel qui se meut à l'extrémité d'un fil inextensible, ayant l'autre extrémité fixe. Ce mouvement est circulaire, mais sur un *arc* de circonférence seulement (fig. 60).

Le pendule étant amené en  $M_1$ , on l'abandonne ; il oscillera de  $M_1$  à  $M_2$ , et la durée de cette *oscillation simple* sera :

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}};$$

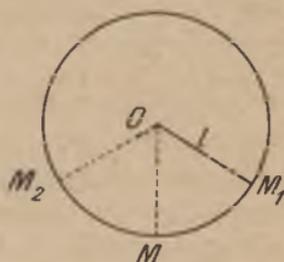


FIG. 60.

$l$  représente la longueur du pendule, et les oscillations sont supposées petites.

La théorie du pendule fait appel aux ressources du calcul différentiel et intégral que nous ne saurions employer dans un traite

élémentaire. Mais nous devons signaler que l'intensité de la pesanteur figurant dans la formule, on peut, inversement, la déduire de la durée  $t$ , pour une longueur  $l$  du pendule. On obtient, à Paris, si on pose  $l = 99^{\text{cm}},39$ , une valeur  $g = 9^{\text{m}},81$ . Ainsi, la longueur du pendule qui, à Paris, baltrait la seconde, est de  $0^{\text{m}},994$  environ.

Dans les mines plus ou moins profondes,  $t$  diminue, donc  $g$  augmente. Mais le pendule réalisable pratiquement est un corps pesant attaché à un fil fixe sur un axe horizontal. C'est ce qu'on appelle un « pendule composé » ; la durée de son oscillation simple est donnée par la formule :

$$t = \pi \sqrt{\frac{I}{Mgl}}$$

$M$  étant la masse du pendule,  $I$  son moment d'inertie (voir § 31), et  $l'$  la distance du point fixe au centre de gravité. Pour réaliser un pendule composé *synchrone* du pendule simple, on calcule :

$$\sqrt{\frac{I}{Mgl'}} = \sqrt{\frac{l}{g}}$$

d'où, évidemment  $t' = t$ , et  $l = \frac{I}{Mt}$ . Dans le *métronome à musique* (§ 205), on a affaire à un pendule qui possède deux branches ; un poids lourd, placé à la partie inférieure, agit pour produire le mouvement, un poids plus faible (*masselotte*), se déplaçant sur la tige, permet de régulariser celui-ci en modifiant le moment d'inertie dont il sera question plus loin.

Les mouvements pendulaires, ayant une certaine amplitude, ce sont, par exemple, les balancements d'un enfant jouant à l'*escarpolette* (balançoire).

**29. Mouvement d'un système matériel.** — Dans le mouvement d'un système matériel, les forces agissantes sont : ou des *forces extérieures* (pesanteur, réaction d'un solide, pression de l'air, etc.) ou des *forces intérieures*, deux à deux égales et opposées, s'exerçant entre les points du système ; ces dernières ont donc une résultante nulle ; et si l'on suppose — ce qui est permis — que la masse du système est réunie au centre de gravité  $G$ , le mouvement sera celui du point  $G$  sous l'action des seules forces extérieures, et il ne dépendra que de ces forces, à l'exclusion des autres. C'est le théorème du mouvement du centre de gravité. Un corps décrira donc dans l'espace, en obéissant à sa vitesse initiale et à la

pesanteur, une parabole; c'est, en réalité, le centre de gravité du corps qui décrira cette parabole. Une bombe qui éclaterait serait encore dans ce cas : le centre de gravité général décrirait la parabole, tandis que les fragments, les éclats prendraient des mouvements indéterminés.

Dans le mouvement d'un système il est utile de considérer le produit  $mv$  de la masse par la vitesse, produit qui s'appelle *quantité de mouvement*.

La force imprimant à la masse une vitesse  $dv$  dans le temps infiniment petit  $dt$ , on a :

$$F = m \frac{dv}{dt},$$

expression qui devient  $F = m\gamma$  pour la durée d'une seconde. Dans le temps élémentaire  $dt$ , on dit que la force a une *impulsion*  $F \times dt$ , équivalant au produit  $m \times dv$ . Depuis l'instant zéro jusqu'à l'instant  $t$ , l'égalité  $Fdt = mdv$  sera la somme de plusieurs produits semblables. Cette somme a pour symbole, dans le calcul intégral :

$$\int_0^t Fdt = MV - MV_0.$$

Cette égalité exprime que, dans un mouvement rectiligne, l'impulsion  $Ft$  développe une quantité de mouvement  $MV$ . Ainsi, pour réduire au repos un wagon de 60 kilogrammes marchant à la vitesse de 5 mètres, et dans l'espace de trois secondes, il faut un effort de  $10^{\text{kg}},200$ , car :

$$F = \frac{MV}{3} = \frac{60}{9,81} \times \frac{5}{3} = 10^{\text{kg}},200.$$

Dans un mouvement curviligne, l'égalité a encore lieu, mais  $F$  désignera la force tangentielle seule.

Considérons, maintenant, la projection sur un plan normal à l'axe  $OZ$ , d'un point qui appartient à un système matériel. Si la direction de la force qui agit sur ce point passe par un même point pendant le mouvement, soit par le point  $O$ , le moment de la force sera toujours nul, à un instant

quelconque. En un mot, et généralisant, la somme des moments des impulsions  $Fdt$ , par rapport à l'axe fixe, sera constamment nulle. Et par conséquent la somme des moments des quantités de mouvement du système ne se modifie pas, ne subit aucun accroissement; cette somme est, en définitive, *constante*; on peut voir que cela revient à dire (fig. 61) que les masses décrivent, avec les rayons  $Om'$ ,  $Om'_1, \dots$ , des aires (surfaces) proportionnelles au temps, et que

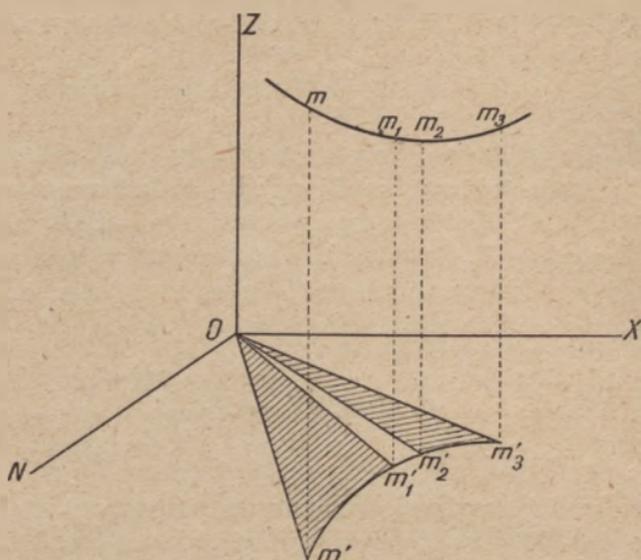


FIG. 61.

la somme des produits de ces masses, formant le système, par les aires décrites *demeure constante*. Tel est le *théorème des aires*, applicable au seul cas des forces extérieures à moment nul. Mais si, par exemple, il n'y avait pas de force extérieure, la somme des aires est *nulle*; c'est le cas d'un homme debout sur un plan parfaitement poli; s'il veut faire tourner son corps, une partie ne tournera pas dans un sens sans que l'autre tourne en sens inverse, de manière que la somme des aires décrites demeure nulle. S'il fait glisser une jambe en avant, l'autre glissera d'autant en arrière et il tombe (voir plus loin § 274). Le *patinage* en est une démonstration.

**30. Travail.** — Quand une force agit pour produire ou pour retarder le déplacement d'un corps (point ou système de points,) on dit qu'elle *travaille*. Le *travail* est le produit de la force par le déplacement  $l$  effectué dans sa propre direction.

On a :

$$\mathcal{E} = F \times l.$$

Une force de 1 kilogramme, déplaçant dans sa direction et sur un parcours de 1 mètre un corps, fait un travail égal à 1 kilogrammètre (symbole : *kgm*): c'est l'unité industrielle.

Dans le système C. G. S., ce sera, comme unité, le travail d'une dyne pour 1 centimètre de déplacement; cette unité est l'*erg* (de *εργον*, travail); la dyne est  $\frac{1}{981}$ , l'erg sera  $\frac{1}{981} \times 1^{\text{cm}}$  ou

$$\frac{0^{\text{kg}},001}{981} \times 0^{\text{m}},01 = \frac{1}{981 \times 10^5}$$
 de kilogrammètre,

c'est-à-dire que le kilogrammètre vaut  $9,81 \times 10^7$  ergs, près de 100 millions d'ergs.

Suivant que la force agit dans le sens du déplacement (ascension d'un escalier) ou pour le contrarier (descente de l'escalier), elle produit un travail *moteur* ou *résistant*. On citerait comme exemple de travail résistant le glissement d'un tonneau sur un plan incliné par le ralentissement de sa chute au moyen d'une corde.

Ce travail résistant est aussi appelé *négalif*, l'autre étant dit *positif*.

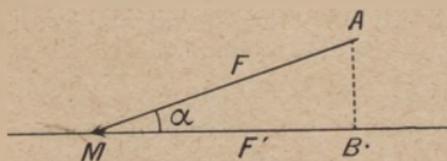


FIG. 62.

Mais la force peut avoir une direction oblique par rapport au déplacement. C'est le cas d'une corde tirant un wagon sur rails dans une direction oblique.

Alors la composante utile seule comptera, c'est-à-dire la projection de  $F$  sur le déplacement, et l'on a :

$$F' = F \cos \alpha,$$

car

$$MB = AM \cos \alpha \text{ (fig. 62).}$$

Pour un déplacement  $l$ , le travail sera :

$$\mathcal{E} = F'l = Fl \cos \alpha.$$

Considérons un déplacement *curviligne*  $MM'$  (fig. 63), la force ayant la direction  $mm'$ ; le travail sera le même que si la force déplace d'une position à l'autre la projection du point  $M$  sur la direction  $mm'$ .

On aura :

$$\mathcal{E} = F \times mm'.$$

Donc le travail d'une force constante en grandeur et en direction ne dépend que de la position initiale et de la position finale du mobile.

Si la force est tangente en chaque point de la trajectoire, le travail sera :

$$\mathcal{E} = F \times MM'.$$

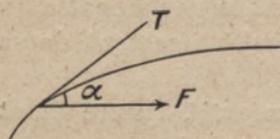


FIG. 64

Sinon, elle formera un angle  $\alpha$  avec la tangente à chacun des points de la trajectoire (fig. 64); si l'on appelle  $dl$  l'élément de longueur parcourue, on aura un travail  $Fdl \cos \alpha$  par élément; au total une somme de travaux élémentaires, l'intégrale

$$\mathcal{E} = \int_0^l Fdl \cos \alpha.$$

Cette expression générale du travail s'applique aux forces constantes comme aux forces *variables* en intensité. Un exemple de forces variables, c'est le cas d'une porteuse de pains; d'étage en étage elle diminue son fardeau; l'effort qu'elle fournit est donc variable tout le long du

parcours vertical où il s'exerce. — Portons les diverses valeurs de  $F \cos \alpha$  en ordonnées, et les longueurs  $dl$

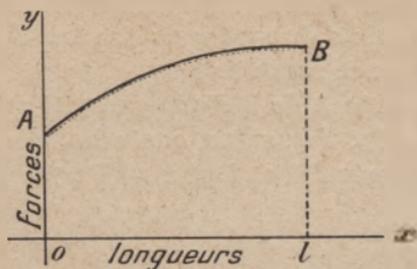


Fig. 65.

en abscisses; les sommets des ordonnées formeront une ligne polygonale (en pointillé) qui se confondra avec la courbe AB. L'aire ABO est la valeur du travail total, ou de l'intégrale ci-dessus (fig. 65). On a

des procédés pour évaluer ces aires limitées par une ligne courbe : c'est d'une part la *planimétrie*, d'autre part la méthode des *Quadratures* (§ 228).

Il est essentiel de bien considérer qu'à elle seule la force ne constitue pas le travail. Si, par exemple, on puise de l'eau au fond d'un puits, l'effort déployé est égal au poids à élever, mais on fait parcourir à ce poids toute la profondeur du puits. Le travail est à la fois cet effort et cette profondeur, c'est-à-dire la résistance surmontée tout le long du parcours. C'est donc le produit des deux facteurs : force et déplacement. De même, il ne suffit pas d'appuyer fortement une lime sur une pièce de métal ; c'est en déplaçant la lime, sous une certaine pression, qu'elle produira du travail, l'*effet vraiment utile*. Toute la mécanique industrielle revient à l'étude du travail des forces.

Il ne serait pas exact non plus d'évaluer le *travail* d'après la quantité d'*ouvrage* effectué, car celui-ci dépend, en outre de l'effort et du déplacement, de divers facteurs : ainsi, deux laboureurs défrichant 100 mètres carrés chacun, celui qui a le terrain le plus dur, les instruments les plus mauvais, accomplit plus de travail que l'autre, l'ouvrage étant cependant le même....

Avant Poncelet (1826) et Coriolis (1829), on employait le mot *force* dans le sens de travail ; cet usage defectueux a disparu aujourd'hui. Du reste les grands physiciens des xvii<sup>e</sup> et xviii<sup>e</sup> siècles (Huyghens, Bernoulli, De La Hire, Lavoisier, Carnot), et un des derniers encore, vers 1848, Helmholtz, n'employaient le terme *force* qu'à bon escient, comme expression du produit d'un poids par une distance.

**31. Travail d'un système déformable.** — Un système soumis à des forces *extérieures* et déformable sous leur action

est sollicité en même temps par des forces *intérieures* ; chacun de ses points se déplace intérieurement et extérieurement ; il y a, de ce chef, *travail extérieur* et *travail intérieur*. Soient A et B deux points du système : l'action de l'un égale la réaction de l'autre ; ce sera une force F (fig. 66). Si la déformation du corps écarte A de B d'une quantité  $dr$  très petite, le travail sera  $+(F \times dr)$  ; si, au contraire, elle les rapproche, le travail sera négatif et égal à  $-(F \times dr)$ .



FIG. 66.

L'ensemble des points du système donnera lieu à un travail intérieur total qui sera la somme, positive ou négative, de ces travaux élémentaires  $Fdr$ . On la désigne par  $\mathfrak{C}_i$ . Dans un solide *parfait*, indéformable,  $\mathfrak{C}_i = 0$  : le travail des forces intérieures est nul ; on ne considère que le travail des forces extérieures  $\mathfrak{C}_e$ .

Le travail intérieur est d'ordre moléculaire ; ainsi les molécules d'un gaz, agitées en tous sens par une variation de température, donnent lieu à un travail  $\mathfrak{C}$ , qui n'est pas nécessairement nul ; les molécules d'un solide se déplacent aussi dans le verre, dans les métaux (déplacement du zéro des thermomètres) ; une agitation intérieure, facile à révéler, existe dans les muscles qui soutiennent un effort de quelque durée, un *effort statique*, et ces vibrations moléculaires constituent un travail ; certains savants ont même créé, à cet effet, le nom de *travail statique* (Heidenhain, Haughton, Chauveau) ; l'idée, quoique juste, n'impose pas cette antithèse singulière : travail supposant le mouvement, et statique signifiant absence de mouvement.

**32. Force vive. — Principe des forces vives. —** Soit un corps de poids P tombant d'une hauteur  $h$ . La pesanteur effectue un travail  $\mathfrak{C} = P \times h$ . Mais nous savons que  $P = mg$ , et que  $h = \frac{1}{2} gt^2$  ; par suite :

$$\mathfrak{C} = \frac{1}{2} mg^2 t^2$$

Comme, au temps  $t$ , la vitesse est  $v = gt$ , on aura :

$$g^2 t^2 = v^2,$$

et enfin :

$$\mathfrak{C} = Ph = \frac{1}{2} mv^2.$$

Qu'il s'agisse d'un point ou d'un système matériels, cette égalité  $\mathfrak{C} = \frac{1}{2} mv^2$  se vérifie, pourvu que, par travail du système, on entende la somme  $\mathfrak{C}_e + \mathfrak{C}_i$  des travaux extérieurs et intérieurs, ces derniers pouvant n'être pas nuls. Le produit  $mv^2$  a été appelé *force vive* (Leibnitz) et le demi-produit  $\frac{1}{2} mv^2$  *puissance vive* (Belanger).

Ainsi, le travail fourni à un système matériel lui communique une certaine puissance vive, celle-ci devenant en quelque sorte, un « travail disponible » dans le système. Si, par exemple, on arme un ressort en le comprimant par un poids  $P$ , le poids effectuera un travail  $P \times r$ , pour un raccourcissement  $r$  du ressort ; et le poids enlevé, le ressort se détendra en manifestant une puissance vive  $\frac{1}{2} mv^2 = Pr$ .

La puissance vive emmagasinée, « latente » fournira donc du travail en devenant « réelle (1) ».

Donnons à un volant en marche une certaine quantité de travail, sa vitesse passera de  $v$  à  $v'$ , et sa puissance vive de  $\frac{1}{2} mv^2$  à  $\frac{1}{2} mv'^2$ . Le travail fourni se retrouve donc dans cet accroissement de puissance vive. On écrit :

$$\mathfrak{C} = \frac{1}{2} mv'^2 - \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} m (v'^2 - v^2).$$

C'est là l'expression du *principe des forces vives*.

33. Étant donné que la vitesse d'un corps *tournant* autour d'un axe fixe est  $\omega r$  (§ 2), sa force vive sera  $m \omega^2 r^2$  et sa puissance

(1) Expressions déjà employées par Lazare Carnot (*loc. cit.*, p. 247).

vive  $\frac{1}{2} m\omega^2 r^2$ . Le rayon  $r$  varie suivant la position de chaque point par rapport à l'axe ; on calcule, pour le corps donné, une valeur de  $r$ , désignée par  $\rho$ , et qui peut se substituer à toutes celles de  $r$  ; en un mot toute la masse en rotation est supposée placée sur une circonférence de rayon  $\rho$  ; et l'on a, en général,  $\frac{1}{2} \omega^2 M\rho^2$ ,  $M$  étant la masse totale ;  $\rho$  est appelé le *rayon de gyration* du corps et  $M\rho^2$  son *moment d'inertie*. Ainsi la puissance vive d'un corps tournant est le demi-produit du carré de la vitesse angulaire par le moment d'inertie.

Connaissant la masse  $M$  et la vitesse angulaire, on se servira de la figure du corps pour avoir son rayon de gyration. Il est facile d'établir, par exemple, les valeurs suivantes :

1° Tige rectiligne ayant l'axe de rotation perpendiculaire à son extrémité (d'ailleurs mince) et une longueur  $l$  ; on a :

$$\rho^2 = \frac{l^2}{3}.$$

2° Cylindre droit à base circulaire, de rayon  $r$ , tournant autour de son axe ; on a :

$$\rho^2 = \frac{r^2}{2}.$$

Autour d'un diamètre de base et la hauteur étant  $h$  :

$$\rho^2 = \frac{3r^2 + 4h^2}{12}.$$

3° Jante de roue, à section rectangulaire, dont les rayons extérieur et intérieur sont  $r$  et  $r'$  ; on a :

$$\rho^2 = \frac{r^2 + r'^2}{2}.$$

4° Tronc de cône plein, de rayons  $r$  et  $r'$ , de hauteur  $h$ , ayant pour axe une droite située dans une des bases et au centre de figure :

$$\rho^2 = \frac{h^2}{9} \left( 1 + \frac{d}{r+r'} \right) + \frac{(r+r')^2 - 2d^2}{16},$$

$d$  étant la différence  $r - r'$ ,

5° Parallépipède rectangle ayant  $a$ ,  $b$ ,  $c$  pour arêtes, et tournant autour d'un axe mené par le milieu du côté  $b$  parallèlement à  $a$ ; c'est :

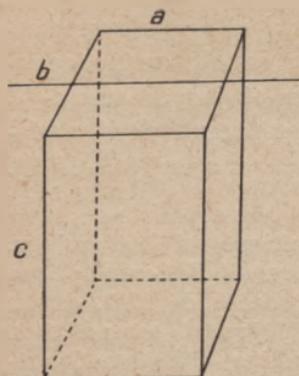


FIG. 67.

$$\rho^2 = \frac{1}{3} \left( c^2 + \frac{1}{4} b^2 \right) \text{ (fig. 67).}$$

Les précédentes valeurs du moment d'inertie ou, plus exactement, du rayon de gyration, se rapportent à des corps *homogènes*. Elles ne conviennent plus, en bonne rigueur, au cas de pièces non homogènes, telles que les pièces composant l'appareil locomoteur des animaux.

**34. Énergie.** — Le fait que la puissance vive est du travail emmagasiné, pouvant être *restituée*, a conduit les physiciens à identifier cette puissance vive  $\frac{1}{2} mv^2$  avec une sorte d'être immatériel capable de se dissimuler et d'apparaître dans les corps : on l'a appelé *énergie*. L'énergie c'est donc la « capacité de travailler » ; elle peut être en réserve ou *potentielle*, comme elle peut se traduire en travail et devenir *cinétique*.

L'énergie cinétique d'un ressort qui se détend est la transformation de l'énergie potentielle qu'il a accumulée quand on l'a bandé (exemple : le ressort de montre qui échange son énergie contre le travail des rouages et des aiguilles).

Tout corps doit ainsi constituer un réservoir d'énergie, ou potentielle, ou cinétique. A la hauteur où un poids se trouve placé, il possède la faculté de produire, en tombant, une certaine quantité de travail ; ce travail mesurera l'énergie cinétique ou de mouvement, laquelle équivaut exactement à l'énergie potentielle ou de repos. En tout cela « quelque chose s'est conservé », et n'a fait que changer de forme. Un autre intérêt de la notion d'énergie est qu'elle a permis de comprendre la *production de chaleur par frottement* :

Rumford, Davy, et divers autres savants ont montré que le frottement — véritable énergie mécanique — se transforme en chaleur ; le mouvement devient le *calorique*. On soupçonnait aussi la lumière de se transformer en chaleur, et celle-ci de fournir la « force » des machines et des animaux (1). Toutes ces idées allaient être précisées par un petit médecin allemand, de Heilbronn : *Robert-Jules Mayer* (1814-1878).

L'historique de la naissance de l'énergetique est fort curieux. Le mot « énergie », dans l'acception de *travail*, fut employé par Bernoulli dans une lettre à Varignon (2) datée de 1717, et par Couplet (3) en 1726. Young le reprit (4) en 1807 ; mais son adoption exclusive en physique eut lieu grâce à Rankine et William Thomson (plus tard lord Kelvin), entre 1850 et 1870. Toutefois nombre de physiciens, depuis Huyghens (1680), Leibnitz (1696) et Lazare Carnot (1803), jusqu'à Helmholtz (1847), se servirent de l'expression *force vive* pour désigner le travail, ou plus brièvement du mot « force » (5).

Ce qui, alors, scandalisait les savants, c'était que la « force » put s'anéantir. Mais Leibnitz résolut la difficulté en expliquant que dans le choc, dans le frottement, la force vive perdue donnait naissance à de la chaleur par agitation des particules choquées ou frottées. « Les forces, disait-il, ne sont pas détruites, mais dissipées parmi les parties menues. Ce n'est pas les perdre, mais c'est faire comme ceux qui changent la grosse monnaie en petite (6). »

Ainsi la chaleur fut regardée sous l'aspect d'un mouvement des parties invisibles des corps, « mouvement varié et très rapide » d'après Robert Boyle (7), Rumford (8), Young (déjà cité), Davy (9),

(1) Herschell, *Outline of astronomy*, 1833.

(2) Varignon, *Nouvelle Méchanique*, 2 vol., 1725.

(3) Couplet, *Mémoires de l'Acad. roy. des sciences*, année 1726, p. 119.

(4) Thomas Young, *Lectures on natural philosophy*, VIII, 1807.

(5) Par exemple, le fameux *Mémoire sur la conservation de la force*, de Helmholtz (1847), traduction française de Pérard (1869). Cette publication, qui fit grand bruit à l'époque, nous paraît aujourd'hui médiocrement intéressante.

(6) Leibnitz, *Mém., Acad. Sciences*, 1728.

(7) Robert Boyle, *Œuvres*, III, 1744.

(8) Rumford, des 1798 ; voir *Mémoires de l'Institut*, 1804, et *Essais*.

(9) Davy, *Elém. philos. chim.*, trad. Van Mons, 2 vol., 1813-1814 ; I, p. 53.

Ampère<sup>(1)</sup> et Fresnel<sup>(2)</sup>. Ce dernier physicien déclarait en termes très nets que la chaleur est une vibration. Et, jusqu'à cette date (1822), seule était admise la transformation du travail (frottement, choc) en chaleur, relation exclusivement *qualitative*. On n'entrevoit nullement la possibilité d'une relation *quantitative*.

En 1824, Sadi-Carnot<sup>(3)</sup> se posa la question de la *production de travail aux dépens de la chaleur*, telle que la réalisent les machines à vapeur. Comparant ces machines thermiques aux machines hydrauliques, il reconnut que la *puissance motrice du feu dépend de la différence de température* entre la chaudière et le condenseur, absolument de même que la puissance motrice de l'eau dépend de la différence de niveau des biefs amont et aval. Dans des notes posthumes, publiées en 1878 seulement (quarante-six ans après sa mort), nous trouvons que Carnot admettait une *destruction* de chaleur dans la transformation de celle-ci en travail; il était donc parvenu à cette loi d'*équivalence* de la chaleur et du travail. Mais sa pensée s'était arrêtée spécialement sur le fait que *sans chute de température, sans rupture de l'équilibre thermique*, il n'était pas de puissance motrice possible. Le *maximum* de cette puissance, autrement dit la plus grande quantité de travail d'une machine thermique, est fixé par cette différence de température.

Remarquons que déjà Pictet<sup>(4)</sup> attribuait à la chaleur une *tension*, et que Berthollet écrivait ces lignes curieuses : « On peut comparer cette tension à l'effort d'une substance élastique qui se met en équilibre d'élasticité avec les autres substances semblables qui réagissent sur elle; son effet est d'autant plus grand qu'il y a plus de distance entre leurs températures; d'où l'on peut tirer cette conclusion que le calorique agit avec d'autant plus d'énergie, entre les corps dont la température est différente, que sa tension est plus grande<sup>(5)</sup> ». Ce principe, affirmé par Berthollet en 1803, nous paraît avoir inspiré tous les auteurs, à commencer par Carnot. « On peut dire, enseignait Poncelet en 1826, qu'une certaine quantité de chaleur doit développer contre les résistances, directement opposées à son action, des quantités de travail absolues qui sont toujours les mêmes ou indépendantes du mode de cette action et de la nature des corps... Ce principe a quelque analogie avec celui qui a été mis en avant par M. Sadi-Carnot,

(1) Ampère, *Ann. phys. et chimie*, 1821, t. LVIII, p. 432.

(2) Fresnel, *De la Lumière* : addition à la *Chimie* de Thompson, 1822.

(3) S.-Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu* (1824); réimpressions de 1878 et 1903 (Hermann).

(4) Pictet, *Essais de physique*, 1790; Genève.

(5) Berthollet, *Essai de statique chimique*, I, p. 155; 1803.

ancien élève de l'Ecole Polytechnique, dans un petit ouvrage intitulé : *Réflexions.....* (1). »

Mais Coriolis se contentait d'écrire, en 1829 : « Il paraît que le maximum de travail d'une machine à vapeur dépend de la température à laquelle on forme la vapeur (2). »

Ainsi le principe de Carnot n'éveilla, à cette époque, que de rares échos.

D'un autre côté, Mohr (3), Seguin aîné (4) affirmaient l'équivalence du travail produit et de la chaleur qui en était l'origine. Et leurs affirmations étaient comme les reflets du rêve — c'était le mot — caressé par Hans Oerstedt sur l'universalité des transformations des forces de la nature (5).

La doctrine de l'Équivalence du travail et de la chaleur, puis de toutes les énergies du monde, fut définitivement affirmée par Robert Mayer (6), en 1842, et développée, quant aux énergies de la vie, en 1845.

**35. Principe de Mayer ou de l'équivalence.** — On peut l'exprimer ainsi : « La chaleur se transforme en travail et le travail en chaleur suivant un *taux* absolument invariable », ou encore : « Il existe un rapport d'équivalence constant entre le travail et la chaleur. »

Appelons *grande calorie* (C) la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 0° à 1° un kilogramme d'eau, l'expérience a fourni, entre les mains de Joule, de Hirn, d'Edlund et de tant d'autres physiciens, le résultat suivant : un travail de  $426^{kcm},4$ , ou environ un travail de 425 kilogrammètres équivaut à une grande calorie (C). Inversement, le kilogrammètre

(1) Poncelet, *Mécanique industrielle*, p. 216 (note).

(2) Coriolis, *Traité de la mécanique des corps solides et du calcul de l'effet des machines*, 2° éd., 1844, p. 282 (1° éd., 1829).

(3) Mohr, *Liebig's Ann.*, t. XXIV, 1837.

(4) Seguin aîné, *Comptes rendus Acad. Sc.* 1839, t. XXV, p. 420; et *Etudes sur l'influence des chemins de fer*, pp. 328, 383, 403; 1839 (Marc Seguin, né à Annonay, 1786-1875).

(5) Oerstedt. *La Dynamologie (An sicht der chemischen Naturgesetze...)*, Berlin, 1812.

(6) Jules-Robert Mayer naquit à Heilbronn, en 1814; fils d'un pharmacien, il se fit recevoir docteur en médecine et voyagea ensuite beaucoup à Munich, Paris, les Antilles, etc. Son premier mémoire, de quelques pages, parut dans *Annalen der Pharm. und Chemie*, de Liebig, t. XLII; 1842.

équivalent à  $\frac{1}{425}$  de grande calorie. On a donc défini comme *équivalent mécanique de la calorie* (1) le nombre 425 kilogrammètres, et on écrit :

$$\frac{\text{Travail}}{\text{Chaleur}} = 425 = E.$$

E, c'est le facteur de proportionnalité, le *taux d'équivalence*. En 1843, le physicien anglais Joule démontra que le travail accompli par les machines magnéto-électriques avait sa source dans les réactions chimiques entre les acides et les métaux de la pile, c'est-à-dire en définitive dans l'*oxydation* du zinc. Il admit que la « force » chimique pût devenir « force » calorifique, et celle-ci travail. Chez les animaux, ajouta-t-il, la production de travail est due aux opérations chimiques de l'organisme qui développent de la chaleur, si bien que les réactions demeurant constantes, l'ascension d'une montagne tendrait à refroidir le corps (2).

Plus physiologiste que Joule, Robert Mayer examina ce dernier problème dans un mémoire admirable (3), paru en 1845 : « La force chimique contenue dans les aliments introduits et dans l'oxygène respiré est la source de deux genres de forces : le mouvement et la chaleur ; et la somme des forces physiques fournies par un animal est l'équivalent de la somme totale fournie par le processus chimique qui a lieu en même temps. Si l'on ajoute, après l'avoir converti en chaleur, tout le travail mécanique fourni pendant un certain temps par un cheval, à la chaleur produite dans son corps simultanément, la somme sera la quantité exacte de chaleur qui équivaut au phénomène chimique. »

Avec Helmholtz (1847) la doctrine de l'équivalence se généralisa, et désormais, adoptant le terme *Energie*, tous les physiciens vérifièrent que l'*Energie* est « ce qui se conserve »

(1) Cette appellation est de Robert Mayer lui-même.

(2) Joule, *Philos. Mag*, 1843, 3<sup>e</sup> s., t. XXIII.

(3) Jules-Robert Mayer, *Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhang mit dem Stoffwechsel*, 1845 (trad. par Pérard en 1872, sous le titre : *Du mouvement organique*).

dans les transformations suivantes : travail, chaleur, lumière, électricité, etc. La vérification se fait surtout entre le travail et la chaleur ; mais on convertit l'énergie chimique en énergie calorifique et on la compare, sous cette forme, au travail ; on procède de même avec les énergies lumineuse, électrique, etc. Il n'y a pas de doute sur le principe de l'équivalence ou de la *conservation de l'énergie*.

Un corps possède donc le pouvoir de fournir une quantité déterminée d'énergie, sous l'une des formes précédentes ; ce pouvoir est analogue à la *fortune* d'un homme, fortune dont on ne spécifie pas la nature : argent, immeubles, intelligence, etc. L'énergie apparaît ainsi comme un être invisible et universel capable de changer souvent d'aspect, sans changer de grandeur. Elle est un *invariant*, comme disent les géomètres.

**36. Interprétation et application du principe de l'Équivalence.** — Le principe de l'équivalence, relativement aux énergies mécanique et thermique seules, se traduit par la relation :

$$\bar{\tau} = EQ,$$

en unités mécaniques (kilogrammètres), ou

$$\frac{\bar{\tau}}{E} = Q$$

en calories.

Sous une autre forme, la relation peut s'écrire :

$$\bar{\tau} - EQ = 0,$$

et signifie que l'énergie intérieure du corps qui transforme la chaleur en travail n'a pas subi de variation, ou que cette variation est *nulle*. Pratiquement, une masse d'eau chauffée acquiert une tension (vapeur) qui fait *travailler* un piston ; après quoi l'eau est ramenée à sa température initiale, le piston reprend aussi sa position primitive. Le *cycle* des opérations est *fermé*. Le principe de l'Équivalence, en vertu duquel

$$\bar{\tau} = EQ$$

suppose donc un *cycle fermé*.

Une démonstration péremptoire de ce fait résulte d'une expérience due à Edlund : on produit un travail  $\mathcal{E}$  en *tirant* un fil métallique au moyen d'un poids P. Le fil devrait dégager de la chaleur. Or on constate qu'il se *refroidit*, en absorbant  $q$  calories. Pourquoi ? C'est tout simplement parce qu'il est resté *allongé*. Laissons-lui reprendre sa longueur primitive, en retirant le poids : il dégagera  $q'$  calories ; et l'on vérifie que :

$$q' - q = \frac{\mathcal{E}}{E} \quad \text{ou} \quad \frac{\mathcal{E}}{425}.$$

Le retour à l'état initial, l'absence de variation de l'énergie intérieure du corps, est donc nécessaire.

Mais, si le cycle n'est pas *fermé*, si le corps ne reprend pas son état initial, son énergie intérieure aura subi une variation U. On aura donc l'équivalence entre cette variation U et le travail  $\mathcal{E}$  d'une part, la chaleur Q d'autre part :

$$\frac{\mathcal{E} + U}{425} = Q \text{ (en calories).}$$

Dans l'expérience d'Edlund, c'était :

$$q + \frac{\mathcal{E}}{425} = q'.$$

Si, à l'aide de réactions chimiques, un système de corps pouvait produire chaleur et travail, il y aurait équivalence entre la variation de son énergie intérieure U et les phénomènes mécanique et thermique extérieurs, la chaleur pouvant être dégagée (+) ou, au contraire, absorbée. D'où :

$$U = \mathcal{E} \pm EQ.$$

Les chimistes font une intéressante application de cette loi d'équivalence : ils brûlent une substance organique dans une enceinte close et parfaitement rigide ; les gaz dus à la « combustion » ne pouvant se détendre, il n'y aura pas de travail :

$$\mathcal{E} = 0.$$

Donc :

$$U = EQ;$$

toute l'énergie chimique se transformera en chaleur. Tel est le principe de la *thermochimie* ou de l'art de mesurer les « chaleurs de combustion » des substances. A cet effet on emploie généralement la *bombe calorimétrique* de Berthelot, modifiée par Mahler, puis par Donkin : dans l'enceinte de cette bombe la substance est brûlée au contact de l'oxygène comprimé à 25 atmosphères; la chaleur développée se mesure grâce à des procédés corrects et éprouvés pour lesquels nous renvoyons aux ouvrages spéciaux. On fait aussi usage de calorimètres plus simples tel que celui de Bunsen, ou celui de Féry<sup>(1)</sup>.

Mais le cas général est celui où

$$U = \mathcal{E} \pm EQ.$$

Soit une pile électrique faisant marcher une magnéto; il y a un travail  $\mathcal{E}$  et un dégagement de  $q$  calories. Mais on pourrait laisser la réaction chimique de la pile inutilisée; on recueillerait, dans un calorimètre,  $q'$  calories. L'expérience a vérifié, conformément au principe de l'équivalence, que :

$$\frac{\mathcal{E}}{E} + q = q'.$$

En effet, on avait :

Dans le premier cas :

$$U = \frac{\mathcal{E}}{E} + q;$$

Dans le deuxième cas :

$$U = q'; \quad \text{d'où:} \quad q' = \frac{\mathcal{E}}{E} + q.$$

Il en est ainsi chez les êtres vivants. Animaux et végétaux brûlent intérieurement des *aliments*; au repos, ils produiront *exclusivement* de la chaleur. Mais le travail mécanique, dont

(1) Féry, *Journal de Physique*, 1912, p. 550.

seuls les animaux sont capables, conduira à la relation générale :

$$U = \mathcal{E} + EQ.$$

Et cela s'est vérifié rigoureusement (voir § 109).

Enfin, pour ne pas négliger un cas que nous examinerons plus tard en détail, le travail pourrait être *moteur* ou *résistant*, c'est-à-dire *positif* ou *negatif* (§ 30). On écrira, s'il est négatif :

$$U = EQ - \mathcal{E} :$$

la modification de l'énergie intérieure ne sera pas *aussi grande* que si le travail était positif ; ce qui revient à dire que le travail négatif, loin d'être à charge à cette énergie intérieure, tend au contraire à l'épargner.

**37. Principe de Carnot.** — Sadi-Carnot établit, pour exprimer la relation du travail et de la chaleur, dans le sens dynamique de cette forme de l'énergie, un principe d'une haute importance. M. Henry Le Chatelier en a donné l'expression la plus concrète dans la *Loi du déplacement de l'équilibre* ou *Loi de Le Chatelier* : « Tout système produisant du travail est le siège d'une rupture d'équilibre. Réciproquement, partout où il peut y avoir rétablissement de cet équilibre, il peut y avoir production de travail (1). »

Carnot avait montré la rupture d'équilibre thermique dans la *différence de température* entre la vapeur sortant de la chaudière et l'eau rendue au condenseur, différence analogue, dans les chutes d'eau, à la distance verticale du bief aval au bief amont, et sans laquelle l'eau ne travaillerait pas. On peut indiquer, pour chaque espèce d'énergie, les deux facteurs qui la constituent :

Energie mécanique = force (ou poids)  $\times$  chemin parcouru.

Energie calorifique = *entropie* (2)  $\times$  différence de température.

(1) Henry Le Chatelier, *Leçons sur le carbone* (1908). — Nous nous sommes, en grande partie, inspiré des idées exposées dans ce magistral ouvrage.

(2) La notion d'entropie est due à un profond physicien allemand, Clausius (1857).

[L'entropie est une grandeur physique qui joue le rôle de la force ou du poids ; et, de même que la *nature* de ceux-ci ne modifie nullement la valeur du travail mécanique, de même la nature de l'entropie ne change en rien la valeur de l'énergie calorifique.]

Energie électrique = quantité d'électricité  $\times$  différence de potentiel<sup>(1)</sup>.

Energie chimique = masse  $\times$  *potentiel chimique*.

Le potentiel chimique remplace ce qu'on attendait autrefois sous le nom d'*affinité*, mais on n'en sait pas plus long aujourd'hui (voir p. 25).

Revenons à l'énergie calorifique : elle est proportionnelle, avons-nous dit, à l'*écart de température*. Si donc nous la transformons en énergie mécanique, celle-ci, à son tour, sera proportionnelle au même écart de température. Or la vapeur augmente de pression avec la température, de  $\frac{1}{273}$  de sa valeur pour 1 degré ; si, dans une machine thermique, le condenseur se refroidit de 1, 2, 3, ..., degrés, le travail s'accroîtra de :

$$\frac{1}{273}, \quad \frac{2}{273}, \quad \frac{3}{273}, \quad \dots$$

de sa valeur. En refroidissant à 273°, *toute la chaleur* serait transformée en travail. Un condenseur à - 273° serait au *zéro absolu*, température fictive servant pour une *échelle absolue* : ainsi 15° centigrades représentent une *température absolue* de

$$288^\circ = 273 + 15.$$

Dans la machine thermique, une quantité de chaleur  $Q$  est prise à la chaudière, à une température absolue  $T$  ; elle fournit le *travail* ; le reste, une quantité de chaleur  $Q'$ , s'en va au condenseur à une température  $T'$ . Mais nous savons que  $\frac{Q}{T}$  ou  $\frac{Q'}{T'}$ , expriment l'entropie :  $\frac{\text{énergie calorifique}}{\text{température}}$ .

(1) On dit, plus brièvement : intensité  $\times$  potentiel, ou encore, si l'on emploie les unités électriques correspondantes : ampères-volts.

Par conséquent la machine reçoit une quantité d'entropie  $\frac{Q}{T}$  et en restitue une autre  $\frac{Q'}{T'}$ . La quantité de chaleur transformée en travail :  $Q - Q'$ , est une fraction  $\frac{Q - Q'}{Q}$  de la quantité fournie par la source chaude.

Pour que cette fraction soit *maximum*, il est nécessaire que, durant la transformation, aucune perte calorifique (par rayonnement, conductibilité) ne se produise, et, en outre, que la chute de température ait lieu *insensiblement* depuis  $T$  jusqu'à  $T'$ , et qu'*insensiblement* l'eau soit ramenée de  $T'$  à  $T$ ; en d'autres termes, l'eau doit accomplir un *cycle fermé* qui la ramène à son état initial. Une marche par évolution insensible de la température est, nécessairement, une marche *très lente*, telle que la machine soit, à tout instant, tout près de l'équilibre et puisse fonctionner aussi bien dans un sens que dans le sens inverse; c'est la condition dite de *Reversibilité*,

En résumé, pour effectuer le travail maximum, une machine thermique devra réaliser un *cycle fermé et réversible*: c'est ce qu'on appelle un *cycle de Carnot*.

Tout le long de ce cycle,  $Q$  et  $T$  varient de façon telle que l'entropie  $\frac{Q}{T}$  ne change pas en devenant  $\frac{Q'}{T'}$ : elle se conserve. Aussi le principe de Carnot est-il encore appelé Principe de la Conservation de l'Entropie :

$$\frac{Q}{T} = \frac{Q'}{T'}; \quad \text{d'où} \quad Q' = Q \times \frac{T'}{T}.$$

Et la fraction transformée en travail  $\frac{Q - Q'}{Q}$  aura pour expression :

$$\frac{Q - Q'}{Q} = 1 - \frac{T'}{T} \quad \text{ou} \quad \frac{T - T'}{T}$$

Mais s'il y avait quelque part une perte de chaleur, l'entropie ne se conserverait pas : elle tendrait à *diminuer*.

**38. Thermodynamique : énergétique.** — Les deux principes qui régissent les rapports de la chaleur et du travail

constituent la *thermodynamique*. En les étendant à toutes les formes de l'énergie, on a constitué une science complète : l'*énergétique*. Et nous venons de voir que, toutes les fois que le cycle des opérations est fermé, la loi d'équivalence s'applique ; toutes les fois que ce cycle fermé est réversible, le principe de Carnot est légitime.

Cependant on fait usage de la loi d'équivalence même quand les phénomènes ne réalisent pas un cycle fermé ; et on écrit :

$$U = \mathcal{E} \pm Q.$$

L'expérience justifie cette équation. De plus on en fait usage dans les *phénomènes irréversibles*, qui ne suivent qu'un sens unique : tel est le travail de frottement ; celui-ci donne de la chaleur, mais avec la chaleur on ne reproduit pas le frottement.

La nature évolue d'une manière irréversible ; elle suit un sens et ne renverse pas sa marche ; la *vie* se développe dans le sens de la vieillesse, jamais dans celui du rajeunissement.

**39. Comparaison des formes d'énergie.** — Pour comparer quantitativement les énergies, il faut une *commune mesure*. On est convenu d'adopter la *calorie*. L'énergie mécanique s'évalue à raison de 425 kilogrammètres par grande calorie ; l'énergie solaire, recueillie sur une pile thermo-électrique, donne sa mesure en calories. S'agit-il d'énergie électrique ? On lui opposera une résistance qui la transformera en chaleur. L'unité commune est donc la calorie, mais il ne s'ensuit pas que la *nature de l'énergie* soit semblable sous tous ses aspects, et qu'elle soit toujours réductible à l'*espèce calorifique*. C'est que, précisément, au point de vue *qualitatif*, les énergies forment une hiérarchie. Les unes (mécanique, élastique, électrique) sont interchangeables sans que, dans cet échange, elles prennent la voie calorifique ; cela constitue un avantage, car la chaleur n'est jamais un intermédiaire utile, elle persiste en son propre état, et ne conduit point aux états mécanique, élastique, électrique ; elle détermine une dépréciation, une *dégradation* des énergies mentionnées.

D'autres énergies, au contraire, sont fournies par la *radia-*

tion (lumineuse, calorifique) et tombent toujours à l'état de chaleur; elles se *dégradent* fatalement; c'est ainsi que la machine à vapeur ne développe un travail qu'en dégradant une quantité de chaleur, rejetée *inutilement* au condenseur. C'est un fait capital dans la doctrine de l'énergétique que les énergies aient une tendance naturelle à se *dégrader en chaleur*, tendance inévitable chez les unes, mais pouvant, chez les autres, s'enrayer complètement.

Quant à l'énergie chimique, elle ne se dégrade qu'en partie dans ses transformations en travail ou en courant électrique; elle se dégraderait *entièrement* si les circonstances ne lui étaient pas offertes de se changer en travail ou électricité. C'est pourquoi il convient d'y considérer une *énergie libre*, susceptible de transformations utiles, et une *énergie liée* <sup>(1)</sup> de dégradation (chaleur). Toute réaction chimique *spontanée* tendra évidemment à produire le *maximum de chaleur* (principe de l'énergie maximum de Berthelot) <sup>(2)</sup>.

Il est essentiel de retenir la distinction précédente : les réactions qui ont lieu à l'intérieur d'une pile produiront, si l'on veut, un courant électrique, feront marcher une magnéto, mais si on n'y prend garde, elles donneront uniquement de la chaleur.

C'est en songeant à cette double allure dans le mouvement profond de la matière, mouvement qui peut être *dirigé* vers la production d'un travail ou d'un courant électrique, mais qui, *abandonné à lui-même*, apparaît sous l'aspect calorifique, que Helmholtz attribua un *ordre au premier état*, le second reflétant le *désordre moléculaire*. C'est ainsi, par exemple, que les troupes en marche doivent être *ordonnées* pour garder l'aspect de régularité et suivre une direction commune; laissées à elles-mêmes, elles se débandent et rompent les rangs.

Le désordre s'établit, aussi bien dans ces troupes que dans les mouvements moléculaires, plus facilement que l'ordre : l'état de dégradation est donc *spontané*, il est le plus probable.

(1) La distinction d'énergie libre et d'énergie liée appartient à Helmholtz (*Journal de Physique*, 1884, p. 408 et suiv.).

(2) Il est dit, improprement, *principe du travail maximum*.

Non moins curieuse la constatation du fait que l'énergie chimique peut se changer en toutes les autres formes, sans qu'aucune de celles-ci puisse s'y transformer à son tour. Toutefois la *radiation solaire* ou même une source lumineuse artificielle, agissant sur les feuilles *vertes* des plantes, organise la matière *vivante*. La *chlorophylle* des végétaux est indispensable à cette œuvre de synthèse. L'énergie chimique s'accumule ainsi peu à peu ; l'absence de travail important lui permet de se soustraire, dans le corps végétal, à toute diminution.

Et l'on doit reconnaître que la radiation solaire est l'origine de toute énergie dans le monde, tandis que les deux pôles des transformations énergétiques sont : l'énergie chimique et l'énergie calorifique.

**40. Énergie vitale.** — Les enseignements de l'énergétique sont vrais aussi bien dans le monde animé que dans le monde inanimé. Ainsi le nombre de calories apportées à l'organisme par une quantité donnée d'aliments se retrouve *exactement* dans les calories rayonnées, emportées au dehors de cet organisme. S'il y a production de *travail*, celui-ci absorbera le nombre de calories voulu par la loi d'équivalence, le reste étant également rejeté à l'extérieur. Donc, l'énergie *vitale* ne représente rien *quantitativement* ; il n'y a pas de place pour elle dans le cycle énergétique (voir § 109).

Existe-t-il une *énergie intellectuelle* faisant les frais de toutes les manifestations de la pensée ? Apparemment non, car l'expérience a montré que la balance des énergies est toujours *exacte* et toujours *la même* que *l'homme se livre ou non* à des occupations intellectuelles (voir § 156).

Existe-t-il enfin, parmi les éléments de la matière nerveuse cérébrale, une source d'énergie intellectuelle qui ne soit pas perceptible par nos méthodes de mesure, qui ne relève pas des évaluations calorimétriques ?

Une telle question n'a rien d'absurde ; mais jusqu'ici nulle donnée expérimentale n'a permis d'établir la présence d'une source d'énergie, dans l'homme, qui soit d'une *tout autre nature* que les énergies connues. La science ne doit donc pas en faire état pour l'instant.

Le problème des énergies mystérieuses de l'organisme se ramène à celui des réactions intra-cellulaires, de leur variété, des lois souvent obscures qui les régissent. La *résistance* des animaux vivants à des conditions déprimantes, pathogènes, toxiques, avait induit les médecins — il s'agit des anciens — à supposer une *force vitale* d'intensité variable, soit dans le sang, soit dans le système nerveux. Un peu de cette doctrine, et un peu de la croyance à l'*âme*, se sont rencontrés dans certains esprits pour les décider en faveur d'une *énergie* spéciale à l'être humain; c'était une survivance du « souffle divin ».

Aujourd'hui, ces hypothèses toutes gratuites tendent à se parer du manteau de la *radioactivité*, laquelle se manifeste dans la matière solide, liquide ou gazeuse. Le fait qu'une simple trace de substance radioactive émet, presque indéfiniment, des énergies lumineuse, thermique, électrique, laisserait la porte ouverte à une *théorie radioactive de la pensée* : la matière nerveuse se dissocierait, se désagrégerait de manière à développer de l'énergie intellectuelle.

La science positive ne saurait s'embarrasser de telles suppositions. Sans doute on a trouvé <sup>(1)</sup> que les tissus de l'homme sont radioactifs, que le cerveau jouit même d'une activité particulière. Mais le phénomène est en rapport avec l'alimentation, laquelle enrichit l'organisme d'éléments radioactifs; aussi les sujets âgés accusent-ils une intensité supérieure à celle qui s'observe chez les jeunes. La mort ne supprime pas cette radioactivité, alors que toute pensée a disparu. Il convient donc de réserver son opinion sur ces problèmes difficiles et incertains.

Enfin, relativement au rôle des organes nerveux, on est conduit à admettre qu'une énergie d'une forme inconnue en émane qui ne se laisse pas mesurer en calories, et qui, par conséquent, nous échappe. L'énergie nerveuse, qui s'appelait autrefois « fluide nerveux », après avoir été « les esprits animaux » de l'école cartésienne, intervient dans les fonctions de l'animal comme une amorce : elle déclenche des rouages dont la marche ne lui coûte absolument rien, du moins d'après les évaluations calorimétriques.

Ce serait, toutefois, manquer du véritable *esprit scientifique* que d'admettre la réalité des *forces occultes*. Aucune confusion n'est possible entre les phénomènes de la Pathologie nerveuse, connus par les expériences d'Hypnotisme, d'Automatisme psychologique, etc., — et les prétendues manifestations *metapsychiques*. De même que la Métaphysique n'a rien à voir avec les certitudes de la Physique, de même la Metapsychique doit être rejetée hors le domaine de la *Psychologie expérimentale* <sup>(2)</sup>.

(1) R. Werner, *Münsch. med. Wochenschrift*, n° 1 : 1906; A. Caan *Sitzungsab. d. Heidelb. Akad. d. Wissensch.*, mémoire V : 1911.

(2) Consulter aussi notre livre : *Organisation physiologique du travail*, chap. VII, Paris, 1917 (trad. angl. par Stanley Kent, London, 1918).

41. Dégénération de l'énergie : résistances passives. — Les phénomènes naturels tendent tous à transformer les énergies dans une seule de leurs formes : la *chaleur* ; c'est pour elle un aboutissement fatal.

Ainsi l'organisme animal *dégrade* en chaleur toute son énergie chimique, s'il est au repos ; mais s'il produit du travail mécanique, celui-ci sera pris sur l'énergie libre, tout le reste se dégradant par la voie calorifique.

Dans le mouvement des corps solides, pareille dégradation, plus ou moins intense, a toujours lieu, vu que les solides *parfaits, indéformables* n'existent pas. Les pièces des machines se déformant quelque peu par leur contact, il en résulte des *frottements externes*, de nature vibratoire, dont la conséquence est une dissipation d'énergie. Ces frottements ou *résistances passives* peuvent tenir à un contact *continu*, par *glissement* ou *roulement* des solides (§ 16), ou bien à un contact de très courte durée, comme dans le *choc*, ou enfin à un frottement contre le *champ magnétique* : ainsi le travail fourni à un disque de cuivre, qui tourne entre les pôles d'un électro-aimant, se transforme en chaleur (Courants de Foucault). Les frottements de glissement et de roulement montrent que les surfaces des corps ne sont jamais parfaitement *polies* : elles présentent des aspérités, d'où s'ensuit un véritable emboîtement des molécules en contact, et c'est là une résistance appelée *force de frottement* capable de s'opposer au mouvement. Qu'il s'agisse d'une surface *glissant* sur une autre surface horizontale, ou d'un cylindre *roulant* dans les mêmes conditions, le frottement sera *proportionnel à la pression du corps et variable d'une substance à une autre*. Soit  $\Phi$  (*phi*, lettre grecque) le frottement de glissement d'un corps de poids  $P$  ; le frottement par kilogramme sera :

$$f = \frac{\Phi}{P} ;$$

c'est l'unité ou le *coefficient de frottement de glissement*.

Soit de même  $\Phi'$  le frottement de roulement d'un cylindre de poids  $P$  ; on aura :

$$\varphi = \frac{\Phi'}{P} \text{ (phi minuscule) ;}$$

c'est l'unité ou le *coefficient de frottement de roulement*. On a par exemple :

|                          | Coefficients de |                   |
|--------------------------|-----------------|-------------------|
|                          | glissement      | roulement         |
| Bois sur bois à sec..... | $f = 0,40$      | $\varphi = 0,002$ |
| Métaux sur métaux.....   | $= 0,19$        | $= 0,002$         |

Il est clair que l'effort nécessaire pour vaincre les frottements est plus grand dans le glissement que dans le roulement. En outre,  $\varphi$  diminue à mesure que le rayon du corps roulant augmente.

Pour un déplacement  $l$ , le travail de glissement ou de roulement sera :

$$\Phi \times l = f \times P \times l \quad \text{ou} \quad \Phi' \times l = \varphi \times P \times l.$$

Ce sont là les valeurs de l'énergie vibratoire dégradée en chaleur (§ 34). Un frottement considérable d'une surface

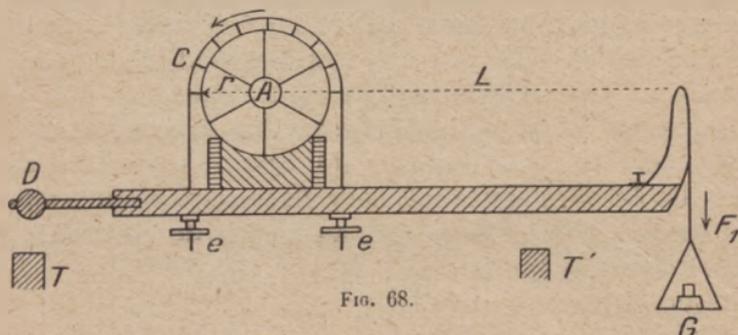


FIG. 68.

en mouvement sur une surface fixe pourrait arrêter, après avoir retardé le mouvement. Tel est le cas du *patin* ou *sabot* qui s'applique sur la *jante* d'une roue et fait office de *frein* ; tel est le cas des freins en général, dont le type classique est le *frein de Prony* ; ici, on fait frotter sur l'arbre de couche A d'une machine (fig. 68) un collier C en fonte, avec des cales en bois et terminé par un levier de longueur L ; en réalité le collier s'adapte à une poulie bien centrée sur l'arbre ; en serrant les écrous  $e, e$ , on fait frotter le collier contre la poulie de manière que la machine prenne une vitesse uniforme égale à celle qu'elle aurait si elle effectuait un ouvrage déterminé, avec les résistances qu'il lui oppose. Donc le travail du frottement équivaut au travail ordinaire de la machine.

Pour que le levier L ne soit pas entraîné dans la rotation

du collier, on place des poids  $F_1$  dans le plateau G, ce qui le maintient horizontal à de légères oscillations près. Le contrepoids D permet d'équilibrer le levier et le plateau avant toute expérience, les mouvements étant d'ailleurs limités par les taquets T et T'. Ainsi, à l'équilibre, la force de frottement qui agit à l'extrémité du rayon  $r$  de la poulie aura le même moment que la force  $F_1$  agissant à l'extrémité du levier L, d'où :

$$\Phi \times r = F_1 \times L.$$

Le travail de frottement  $2\pi r \times \Phi$  par tour aura pour expression  $2\pi F_1 L$ . On évaluera donc, d'après  $F_1$ , déduit de l'expérience, le travail  $2\pi F_1 L \times n$  par  $n$  tours.

Il est bon de retenir : d'une part que l'essai au frein de Prony donne le travail d'une machine faisant  $n$  tours dans un temps connu; et d'autre part que le frottement a permis de produire un effort statique (soulèvement d'un plateau chargé) aux dépens d'une énergie mécanique.

Le frottement de glissement est utilisé dans maintes circonstances, soit pour appuyer les cadres suspendus aux murs, les échelles sur le sol, pour fixer le valet du menuisier, pour entraîner les poulies au moyen de courroies. Il peut être *rectiligne* (cas des traîneaux), *concentrique* à un axe (pivots), ou *circulaire* (tourillons).

Remarquons que lorsqu'un point M glisse avec frottement sur une surface, la force F qui l'entraîne a une composante N qui produit le frottement  $\Phi = f \times N$ ; et une composante tangentielle T qui tend à vaincre ce frottement (fig. 69); l'équilibre ou le début du glissement n'est atteint que si

$$T = \Phi = f \times N,$$

c'est-à-dire qu'à cet instant on aura :

$$\frac{T}{N} = f.$$

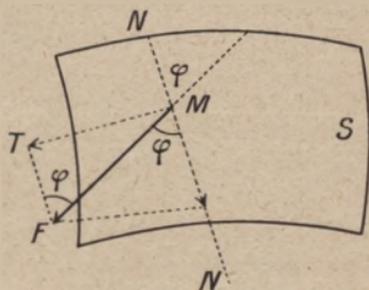


FIG. 69.

Et comme  $T = F \sin \varphi$ ,  $N = F \cos \varphi$ , on aura :

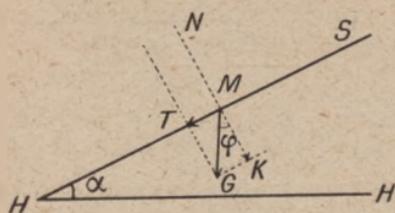


FIG. 70.

$$\frac{T}{N} \text{ ou } f = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \tan \varphi.$$

C'est l'angle de frottement ou la plus grande inclinaison que la force puisse prendre sur la normale. Si cette force est celle de la pesanteur  $G$  (fig. 70), en inclinant peu à peu la surface  $S$  sur un plan

horizontal, on reconnaît sans peine que l'angle de frottement est égal à l'angle d'inclinaison — mais à l'équilibre seulement.

Le frottement de roulement intervient dans le tirage des voitures; il est d'autant plus petit que le rayon de la roue est plus grand, le tirage se produisant tangentiellement. En divisant l'effort de traction d'un véhicule donné par son poids on obtient le coefficient de traction. Ce coefficient est 0,005 sur les chemins de fer, c'est-à-dire que, pour un wagon de 10.000 kilogrammes (10 tonnes), il faut un effort de traction de

$$10.000 \times 0,005 = 50 \text{ kilogrammes.}$$

En chemins de fer, on adopte l'effort de traction par tonne (voir § 267).

42. **Choc.** — Une perte d'énergie a lieu également quand un corps en mouvement choque un corps au repos ou de vitesse moindre; le choc a une durée très faible. Au moment de la collision, le corps de masse  $M$  et de vitesse  $V$  rencontre le corps de masse  $m$  et de vitesse  $v$ ; celui-ci subit une percussion au point de contact (fig. 71). Si le mouvement s'effectue dans le même sens,  $M$  rejoint  $m$  et la vitesse commune sera  $u$ . On a, pour les quantités de mouvement :

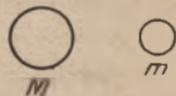


FIG. 71.

$$MV + mv = (M + m) u; \quad \text{d'où} \quad u = \frac{MV + mv}{M + m}.$$

Le choc déforme les corps au point de contact, et cette déformation peut persister, comme dans le choc de deux

billes de plomb, corps dit *plastique*. Dans ce cas, une diminution de l'énergie se produit, car on avait, avant le choc :  $\frac{MV^2}{2} + \frac{mv^2}{2}$ ; après le choc, on a :  $\frac{(M + m) u^2}{2}$ ; la différence, ou la perte d'énergie sera :

$$\frac{1}{2} [MV^2 + mv^2 - (M + m) u^2].$$

En remplaçant  $u$  par sa valeur ci-dessus, on trouve :

$$\text{Perte d'énergie} = \frac{1}{2} \frac{Mm}{M + m} (V - v)^2.$$

Elle équivaut à l'énergie d'une masse  $\frac{Mm}{M + m}$  se mouvant avec une vitesse égale à la différence des vitesses des deux corps antérieurement au choc.

Supposons les deux corps de même masse :  $M = m$ ; alors :

$$\text{Perte d'énergie} = \frac{1}{2} \frac{M^2}{2M} (V - v)^2 \quad \text{ou} \quad \frac{1}{4} M (V - v)^2.$$

Supposons, de plus, que l'un des corps était au repos, soit  $v = 0$ ; alors la perte sera :  $\frac{1}{4} MV^2$ , et le corps percutant perdra la moitié de son énergie. C'est à propos de la force vive ainsi transformée en énergie vibratoire, en chaleur, que Leibnitz fit la comparaison avec une grosse monnaie qui serait changée en petite (§ 34).

Considérons deux corps qui, après la déformation due au choc, reprennent leur état initial grâce à la réaction dite *élastique*; soient, par exemple, deux billes d'ivoire. Au moment du contact, la masse  $M$  perd une vitesse  $V - u$ , et la réaction élastique de  $m$  lui en fera perdre autant, en tout  $2V - 2u$ , ce qui abaisse  $V$  à la valeur finale :

$$V_1 = V - (2V - 2u) = 2u - V.$$

La masse choquée  $m$  avait gagné  $(u - v)$ , et par sa réaction élastique elle en gagne autant, soit en tout :  $2u - 2v$ ;

sa vitesse finale sera donc :

$$(2u - 2v) + v, \quad \text{ou} \quad v_1 = 2u - v.$$

Et les deux corps *élastiques* se quittent, la réaction ayant duré aussi peu que l'action.

En remplaçant  $u$  par sa valeur donnée plus haut, on obtient les vitesses  $V_1$  et  $v_1$  en fonction de  $V$ ,  $v$ ,  $M$  et  $m$ , et l'on vérifiera que :

$$\frac{1}{2} MV_1^2 + \frac{1}{2} mv_1^2 = \frac{1}{2} MV^2 + \frac{1}{2} mv^2.$$

autrement dit que, dans le choc des corps appelés *parfaitement élastiques*, la somme des énergies se conserve, elle est la même après qu'avant le choc. En réalité, cette énergie retrouvée est *moindre* que celle qui a été fournie; il y a une dissipation souvent très faible à l'état de chaleur, dissipation qui augmente si les corps sont bons conducteurs de la chaleur et si le choc dure davantage.

43. C'est dans le choc que l'on rencontre ces forces de durée

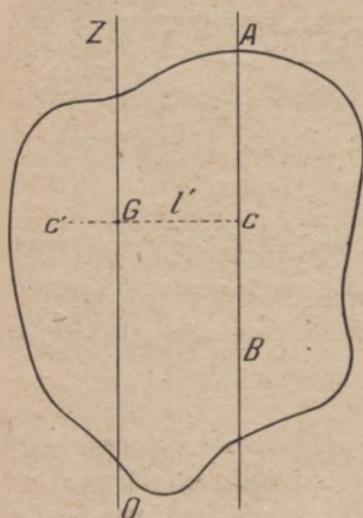


FIG. 72.

si brève qu'on les avait appelées, à tort, « forces instantanées »; ce qui supposerait des solides infiniment *durs*. Hertz a montré, sur des sphères de même rayon, que la durée du choc dépend de la vitesse relative et des propriétés élastiques de la substance. Entre deux cylindres d'acier, Hamburger obtint  $\frac{6}{10.000}$  de seconde, en moyenne; de même Hopkinson, par fermeture d'un circuit de pile au moment du choc.

Nous devons mentionner ici, sans démonstration, le rôle de l'axe de gravité (§ 22) comme axe de rotation d'un corps qui subit une percussion. Si  $I_z$  est le moment d'inertie du corps autour de

l'axe de gravité  $OZ$  (fig. 72), le moment par rapport à un axe paral-

lele AB sera  $I_G + Ml'^2$ , M étant la masse du corps, et  $l'$  la distance des deux axes. Comme  $I = Mp^2$ , on aura donc :

$$I = Mp^2 = Mp'^2 + Ml'^2,$$

ou enfin :

$$I = M(\rho'^2 + l'^2).$$

Si l'axe de rotation est l'axe même de gravité, il est clair que le moment d'inertie sera *minimum*.

D'autre part, en supposant que le corps oscille par rapport à l'axe AB comme un pendule composé de longueur  $l'$ , nous savons que :

$$l = \frac{I}{Ml'},$$

$l$  étant la longueur d'un pendule *synchrone et simple*. Par suite :

$$l = M(\rho'^2 + l'^2) : Ml' = \frac{\rho'^2 + l'^2}{l'} = l' + \frac{\rho'^2}{l'} \quad (\text{? } 28).$$

En prenant la longueur  $cc' = l$ , le point  $c'$  oscillera comme un pendule simple rattaché au point fixe  $c'$ . Le point  $c'$  est le *centre de percussion*. Et pour qu'il n'y ait pas de percussion sur l'axe de rotation AB, il faut que cette percussion soit normale au plan ABG. C'est ainsi que, dans le marteau, la percussion a lieu dans la direction  $PP'$  (fig. 73), et l'on y fait

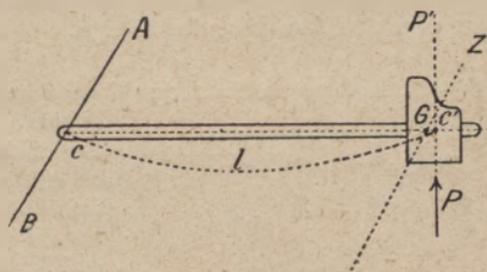


FIG. 73.

$cc' = l' + \frac{\rho'^2}{l'}$ ; le bec du marteau a pour effet de rejeter le centre de gravité entre  $c$  et  $c'$ . Dans ces conditions, la percussion est nulle sur l'axe AB, c'est-à-dire sur la main. La quantité  $c'G = \frac{\rho'^2}{l'}$  est toujours petite.

La connaissance des lois du choc, du centre de percussion est importante dans l'étude des machines: elle trouve une application intéressante dans le *jeu de billard*, une application utile dans le *battage des pieux* ou *pilots* qui se placent sous les fondations, et un emploi sportif (*boxe*).

L'effet du choc exprimé par la quantité de mouvement,

dépend autant de la *vitesse* que de la *masse* du corps. Ainsi une pierre lancée à la main contre une porte la ferait tourner sur ses gonds, tandis qu'un coup de canon ferait passer le boulet à travers la porte sans la déplacer : le mouvement n'a pas eu le temps de se communiquer tout autour de la partie frappée. La vitesse est employée à dépolir le verre par un jet de sable, à couper les métaux au moyen de scies circulaires sans dents, mais animées d'une grande vitesse, ainsi qu'à divers tours amusants.

Le rôle de la masse est non moins net : un clou ne s'enfoncé pas dans une planche si celle-ci n'est pas appuyée ; il vaut mieux se servir d'un marteau assez lourd pour clouer que d'un marteau léger, car  $M$  et  $m$  étant les masses du marteau et du clou, la perte d'énergie due au choc est :

$$\frac{Mm}{M+m} (V - v)^2.$$

Le rapport de cette perte à l'énergie  $\frac{1}{2} MV^2$  du marteau est :

$$\frac{m}{M+m} \left(1 - \frac{v}{V}\right)^2,$$

c'est-à-dire que la perte relative sera d'autant plus petite que la masse  $M$  du marteau sera plus grande et sa vitesse  $V$  plus faible. On sait, d'ailleurs, que les cordonniers se servent d'une pierre pour recevoir le choc du marteau, et que les grosses enclumes n'endommagent pas les parquets. Soit, enfin, une masse  $M$  soutenue par un fil  $a$  et portant un fil identique  $a'$ . En tirant brusquement sur  $a'$ , on casse ce fil ; en tirant doucement, on cassera le fil  $a$  ; car, dans le premier cas, l'impulsion rapide n'a pas permis au choc de se transmettre ; dans le second cas, la masse  $M$  a ajouté son effet à celui du choc (fig. 74).

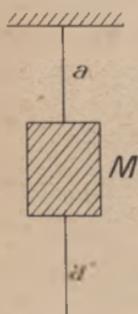


FIG. 74.

**44. Autres résistances passives.** — Certaines autres *résistances passives* interviennent dans le mouvement et obligent à augmenter le travail moteur. C'est, tout d'abord, la *résis-*

*tance des fluides*; suivant que le mouvement se produit dans l'air ou dans l'eau, il en résulte une résistance proportionnelle au carré de la vitesse du courant fluide, à la surface normalement opposée au courant et à la densité du fluide.

On a :

$$R = K \times S \times V^2 \times d.$$

En prenant la densité de l'eau par rapport à celle de l'air, on écrira :

$$R = KSV^2$$

pour la résistance dans l'air. Le coefficient  $K$  est voisin de 13; on exprimera  $S$  et  $V$  en mètres, et  $R$  en kilogrammes. Pour l'eau ce sera  $K'$ .

Les coefficients  $K$  et  $K'$  varient avec la *forme* du corps en mouvement (avion, dirigeable, canot, nageur).

Enfin, on a appelé *raideur des cordes* leur résistance à embrasser la courbure d'un cylindre, résistance qui oblige à employer une certaine force en pure perte pour l'effet utile. On exprime la raideur par cette force  $f$ , et l'on démontre approximativement que :

$$f = \frac{d \times Q}{R + r};$$

elle augmente avec la résistance  $Q$  à déplacer, et la distance  $d$  (coefficient de raideur); elle diminue quand les rayons du cylindre et de la corde augmentent (*fig. 75*). La raideur n'est jamais une valeur négligeable. Pour un poids  $Q = 500$  kgs et  $R = 0^m,025$ , l'expérience a donné  $f = 25$  kg; ce qui conduit à  $d = 7,50$  mm. On diminue la raideur des cordes en les graissant ou savonnant.

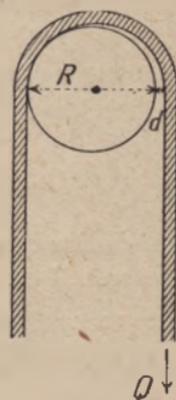


Fig. 75.

## CHAPITRE III

### NOTIONS DE MÉCANIQUE GÉNÉRALE (suite) RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX. — MACHINES

45. **Déformations des corps : élasticité.** — L'étude que nous avons faite de l'équilibre et du mouvement des corps supposait que, sous l'action des forces, ils demeureraient indéformables. Mais cela est faux en pratique, et l'on n'étudie réellement que l'équilibre *contraint* (§ 15) tel que les *forces intérieures* du corps se trouvent mises en jeu. Il convient donc de rechercher brièvement la valeur que prennent ces tensions sous l'action des forces extérieures, et jusqu'à quel degré ces dernières peuvent agir sans vaincre, définitivement, les tensions intérieures, sans rompre le corps. C'est donc, en un mot, l'étude des *déformations* et de la *résistance des matériaux* qui est le complément nécessaire de la science du travail.

Sous l'action des forces, la matière se laisse *tirer, comprimer, cisailer, fléchir et tordre*, et ses molécules, dans chacun de ces cas, se déplacent. Si, l'effort ayant cessé d'agir, les molécules se rétablissent dans leur position primitive, on dira que la matière est *parfaitement élastique*; si elles se rétablissent lentement ou incomplètement, l'élasticité sera *imparfaite*. La définition de l'élasticité sera donc la suivante: propriété de retourner à la forme initiale après qu'une action déformante a cessé de s'exercer. Évidemment, la déformation est proportionnelle à l'effort, tant que la grandeur de cet effort n'aura pas dépassé une certaine valeur pour laquelle le retour à l'état initial sera tout à fait impossible. Cette valeur qui marque le moment où le ressort de la matière va se briser s'appelle la *limite d'élasticité*.

La déformation qui, jusqu'à cette limite, demeurait *élastique*

tique, au delà deviendrait *permanente*; la *rupture* lui fait généralement suite.

Au point de vue énergétique, rien n'est plus utile que de savoir le degré d'élasticité d'une substance. Le travail d'un ressort de montre, par exemple, est la restitution de l'énergie élastique qu'en remontant les rouages on y a emmagasinée; il y a donc utilité et économie à ce que cette restitution soit *intégrale*, c'est-à-dire à ce que l'élasticité du ressort soit parfaite. Et il en est sensiblement ainsi. De même pour le caoutchouc, mais beaucoup moins que pour l'acier.

Par contre, dans la plupart des substances, l'élasticité est imparfaite; il y a un « retard » dans le retour vers l'état primitif et des frottements intérieurs qui dissipent une partie de l'énergie (*Elastische Nachwirkung* de Weber).

La distinction que nous venons de faire est, toutefois, un peu artificielle; l'élasticité, même dans les métaux tels que platine ou acier, se *fatigue* et va en diminuant; les ouvriers savent que les meilleurs ressorts finissent par se fatiguer. A cet effet des *travaux antérieurs, du passé* de la matière, s'en ajoute un autre : la nature de celle-ci favorise plus ou moins la *perte d'élasticité*; en particulier, la *viscosité* permet aux effets du travail de s'accumuler et d'altérer l'élasticité.

**46. Les déformations : traction et compression.** — La plus simple des déformations est celle que produit un effort  $F$  agissant suivant l'axe d'une tige de la substance considérée, la raccourcissant (*compression*) ou l'allongeant (*traction*). Il est clair que, pour l'effort donné  $F$ , la déformation  $l$  sera proportionnelle à la longueur  $L$  de la tige et à un coefficient  $\alpha$  qui caractérise la *souplesse* de la matière <sup>(1)</sup>, c'est-à-dire au produit  $L \times \alpha \times F$ , mais elle sera d'autant plus petite que la section  $S$  de la tige sera plus grande; donc :

$$\pm l = \frac{L \times \alpha \times F}{S},$$

le signe + marque l'allongement, le signe — le raccourcis-

(1) C'est un coefficient analogue à celui de la dilatation des corps par la chaleur.

sement. Les longueurs  $l$ ,  $L$  sont exprimées en *millimètres*, la section  $S$  en millimètres carrés, l'effort  $F$  en kilogrammes. Ainsi plus le *coefficient de souplesse*  $\alpha$  est élevé, plus grande sera la déformation.

On est convenu, cependant, de caractériser les corps par leur *résistance à la déformation*, leur *raideur* ou encore leur *force élastique*; c'est exactement l'inverse de leur souplesse; on a :  $\frac{1}{\alpha} = E$ ,  $E$  portant le nom de *module d'élasticité* ou de *Young*. On écrira donc :

$$(1) \quad \pm l = \frac{L \times F}{S \times E}.$$

Dans le langage vulgaire, on confond très souvent *souplesse* et *force élastique*. Mais on se rappellera que, par exemple, le *caoutchouc* a un grand coefficient de souplesse, et inversement un faible module d'élasticité.

La relation (1) permet de tirer la valeur du module  $E$ ; on a :

$$E = \frac{L \times F}{S \times l}.$$

Faisant  $L = l$  et  $S = 1$  millimètre carré, il viendra :  $E = F$ , c'est-à-dire que le module de Young exprime l'effort capable de *doubler* la longueur d'une tige de 1 millimètre carré. En réalité, cette hypothèse ne se vérifie jamais, car la matière ne se laisse pas déformer jusque-là : elle se *rompt*; sa *tenacité*, qui est la *cohésion* entre molécules, se trouve vaincue définitivement. La vérification de la formule (1) n'a, d'ailleurs, été possible que pour des efforts ne dépassant pas la limite d'élasticité; c'est une condition fondamentale quand il s'agit de ressorts, de dynamomètres, auxquels on pourra appliquer la règle de Robert Hooke <sup>(1)</sup> : *ut tensio, sic vis* (telle déformation pour tel effort).

Quand l'effort augmente au point de vaincre la cohésion de la matière, non seulement la limite d'élasticité se trouve dépassée, mais le corps se *rompt*. La *résistance à la rupture* est la valeur de cet effort limite. Cette résistance, soit à la rupture par traction, soit par compression (écrasement), est donnée par l'expérience; elle dépend d'une façon irrégu-

(1) Robert Hooke, physicien anglais (1635-1703).

lière des dimensions du corps. Ainsi Rondelet et Hodgkinson avaient trouvé, pour les différents bois, qu'elle augmente comme le carré de la section, et inversement, qu'elle diminue comme le carré de la hauteur; on aurait :

$$R = K \frac{s^2}{h^2},$$

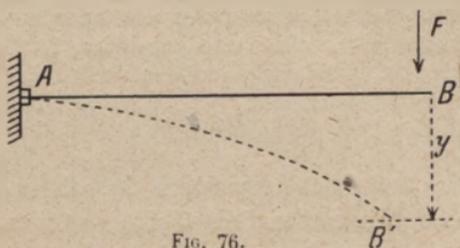
la section étant carrée, et la hauteur égale tout au plus à 15 fois le côté de la section; le coefficient  $K = 2.565$ . On exprime  $K$  en kilogrammes,  $s$  en centimètres carrés,  $h$  en décimètres. Mais l'essence modifie la résistance du bois (1).

On a surtout reconnu que les sections *circulaires* résistent le plus, d'où l'avantage des corps sphériques; les corps cubiques résistent aussi beaucoup. Enfin, le module  $E$  et la résistance  $R$  diminuent par le travail de la matière, sa fatigue; mais augmentent, pour les bois, suivant la densité, l'âge et l'état de sécheresse.

Donnons ici quelques chiffres :

|                                | Module de Young                            | R (résistance à la rupture)        |
|--------------------------------|--|------------------------------------|
| Acier.....                     | $E = 20.000 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$ | $83 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$ |
| Bois de sapin (suivant l'axe). | $E = 1.100 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$  | $8 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$  |

47. Flexion. — Lorsqu'une tige prismatique se trouve en-



castrée par un bout, et soumise à un effort par l'autre bout, elle subira une déformation appelée flexion. La face supérieure sera allongée (convexe); la face inférieure raccourcie

(concave), et dans l'intervalle il y aura une fibre invariable ou neutre. La flèche  $y$  sera, toutes choses égales, proportionnelle à l'effort  $F$  (fig. 76).

(1) D'après Tanaka, de Tokio (Voir *Genie civil* du 23 novembre 1912); et Carrington (*Philos. Magaz.*, 1921, t. XLI, p. 848).

On démontre qu'elle varie comme le *cube* de la longueur  $L$  de la tige, et en raison inverse de la largeur  $a$  de la section <sup>(1)</sup> ainsi que du cube de l'épaisseur  $e$  (fig. 77). On a :

$$(2) \quad y = \frac{4FL^3}{Eae^3}.$$

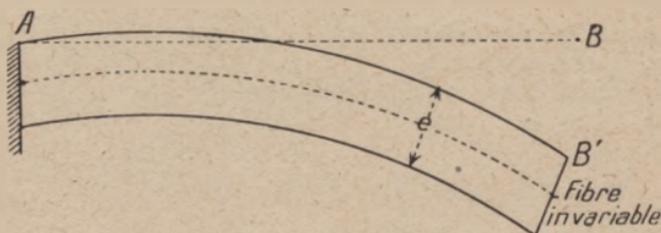


FIG. 77.

Si la section est circulaire, de rayon  $r$ , cette formule deviendra :

$$(2 \text{ bis}) \quad y = \frac{4FL^3}{3E\pi r^4}.$$

On voit combien il est utile d'avoir des pièces à grande section et des substances d'un grand module d'élasticité. Et l'on remarque un fait d'une extrême importance : c'est que la déformation ne s'étend pas au centre ; on réaliserait donc une sérieuse *économie* de matière en prenant des tiges creuses ; ou encore la même quantité de matière répartie à la périphérie, pour que l'intérieur soit creux, donnera une section plus grande et une résistance à la flexion plus considérable. C'est ce qui a lieu dans les tiges des végétaux, les os, les rémiges des oiseaux, etc. <sup>(2)</sup>. La loi se résume ainsi : *gain de force, économie de matière*.

Pour en donner une application familière, la résistance à la flexion d'une feuille de papier sera d'autant plus grande,

<sup>(1)</sup> La largeur  $a$  est perpendiculaire à la direction de l'effort ; l'épaisseur  $e$  est parallèle à cette direction.

<sup>(2)</sup> L'observation est de Galilée, *Discorsi e dimostrazioni* ; voir *Opere*, vol. VIII et IX, édition de Milan, 1811.

si on la roule en tube, que la partie creuse de ce tube sera de section plus large.

EXEMPLE. — Soit une tige creuse; le rayon extérieur est  $R$ , le rayon intérieur  $R'$ ; la section pleine est :

$$\pi R^2 - \pi R'^2 = \pi(R^2 - R'^2);$$

Si toute la tige était pleine, la masse de substance aurait donné une section de rayon  $r$ , telle que :

$$\pi r^2 = \pi(R^2 - R'^2) \text{ (fig. 78).}$$

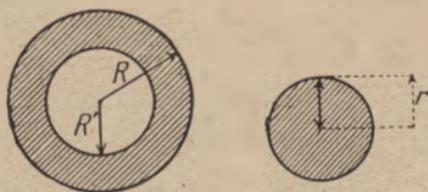


FIG. 78.

Appliquons la formule (2 bis), on a :

$$y = \frac{4FL^3}{3E\pi(R^4 - R'^4)} \text{ dans un cas,}$$

$$y' = \frac{4FL^3}{3E\pi r^4} \text{ dans l'autre.}$$

Supposons  $R = 2R'$ ; alors  $\pi r^2 = \pi \left( R^2 - \frac{R^2}{4} \right)$  ou  $r^2 = \frac{3}{4} R^2$ .

Par suite :

$$y = \frac{4FL^3}{3E\pi \left( R^4 - \frac{R^4}{16} \right)} = \frac{64FL^3}{45E\pi R^4}, \quad \text{et} \quad y' = \frac{4FL^3}{3E\pi \frac{9}{16} R^4} = \frac{64FL^3}{27E\pi R^4}.$$

Les deux fleches sont donc entre elles comme 27 et 45 :

$$\frac{y}{y'} = \frac{1}{45} \cdot \frac{1}{27} = \frac{27}{45} = \frac{3}{5}.$$

En d'autres termes, la résistance de la tige pleine est les  $\frac{3}{5}$  de celle d'une tige creuse de même masse dont le rayon extérieur est double du rayon intérieur.

Elle serait à peine le quart si  $R' = \frac{4}{5} R$ . Dans les os dits « os longs » de l'homme (§ 68), on a généralement  $R'$  compris entre  $\frac{1}{2} R$  et  $\frac{2}{5} R$  : c'est sensiblement  $R' = \frac{1}{2} R$  pour l'os de la cuisse ou *fémur*.

Quand la tige est simplement posée sur deux appuis (fig. 79), ou quand elle est encastree à ses deux extrémités

(fig. 80), les flèches sont respectivement :

$$y' = \frac{FL^3}{4Eae^3} \quad \text{et} \quad y'' = \frac{FL^3}{16Eae^3},$$

c'est-à-dire 16 et 64 fois plus petites.

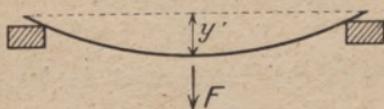


FIG. 79.

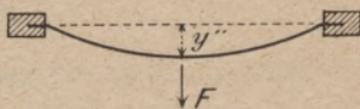


FIG. 80.

Le calcul montre aussi qu'on peut *réduire graduellement* la section d'une tige encastree par une extrémité, depuis cette extrémité; et que la résistance à la flexion demeurera constante. La forme que l'on réalise est un *profil parabolique*, comme c'est le cas dans les balanciers pour machines à vapeur : c'est une forme dite d'*égale résistance*, ayant l'avantage d'alléger la pièce et d'économiser la matière. Les tiges des végétaux, les plumes des oiseaux sont bien près d'être des formes d'égale résistance.

48. **Torsion.** — Un troisième mode de déformation a lieu quand un effort *tangential*, un couple de forces agit sur un cylindre et fait glisser les couches de matière les unes sur les autres. Le *glissement* ne s'étend pas à la partie centrale, qui sera la *fibre invariable*. Pour un angle de torsion  $\theta$ , une tranche  $OO'AB$  se trouvera amenée en  $OO'AB'$  par exemple (fig. 81), en supposant fixe la base  $OA$ , et le couple appliqué normalement à l'axe, sur  $O'B$ .



FIG. 81.  
Torsion d'un cylindre.

On démontre que l'angle de torsion est proportionnel au *moment tordant*  $M$  et à la longueur  $L$  de l'axe, mais inversement proportionnel à la 4<sup>e</sup> puissance du rayon et à un coefficient  $G$  appelé *module de torsion* ou de

rigidité. On écrit :

$$(3) \quad \theta = \frac{2ML}{\pi r^4 G}.$$

Dans le cas d'un cylindre creux, dont les rayons seraient  $r_1$  et  $r_1'$  on trouverait :

$$\theta' = \frac{2ML}{\pi G (r_1^4 - r_1'^4)}.$$

Il est clair que la même quantité de matière permet de donner à  $r_1$  et  $r_1'$  des valeurs telles que l'on ait :

$$r_1^4 - r_1'^4 > r^4;$$

ce qui augmente la résistance à la torsion du cylindre considéré.

On a l'habitude, dans la pratique, de substituer le diamètre  $d$  au rayon  $r$ , et d'écrire :

$$r^4 = \frac{d^4}{16}, \quad \text{d'où} \quad \theta = \frac{32ML}{\pi d^4 G};$$

en bloquant  $\frac{\pi G}{32}$  en un seul terme  $\gamma$  appelé *coefficient de Coulomb*, on obtient :

$$\theta = \frac{ML}{\gamma d^4};$$

d'où le moment :

$$M = \gamma \frac{d^4 \theta}{L}.$$

Le moment de torsion  $M$  s'exprime par le produit de l'effort  $F$  par le diamètre  $d$ , car c'est un couple qui agit sur l'axe. Les unités industrielles étaient le kilogramme et le millimètre, mais on adopte aujourd'hui le gramme et le centimètre, soit une unité de moment 100 fois plus faible, de sorte que, pour un même angle de torsion, la valeur en grammes-centimètres est 100 fois plus grande qu'en kilogrammes-millimètres. Ainsi  $G$  est égal à 8000 kilogrammes pour l'acier, 400 pour le chêne, etc. On en déduit pour  $\gamma$  les valeurs 785 et 39, soit en grammes-centimètres  $78,5 \times 10^3$  et  $3,9 \times 10^3$ .

Pour tordre d'un radian ( $57^\circ 18'$  environ) une tige en chêne de 6 centimètres de diamètre et 25 centimètres de long, il faut un couple :

$$M = 3,9 \times 10^3 \cdot \frac{60^4 \times 1}{250} = 20 \times 10^7 \text{ grammes-centimètres,}$$

soit, à la distance  $d = 6$  centimètres et, en kilogrammes, un effort de 33.300 kilogrammes ; pour tordre la tige d'un degré, il suffirait de :

$$\frac{33.300}{57^{\circ},48'} = 581 \text{ kilogrammes environ.}$$

Entre le module de Young  $E$  et le module de rigidité  $G$  existe la relation :

$$G = \frac{E}{2(1 + \sigma)},$$

le coefficient  $\sigma$  indiquant le rapport de la contraction transversale à l'allongement d'une tige. Ce coefficient  $\sigma$  de Poisson est  $\frac{1}{2}$  pour le caoutchouc, d'après les données les plus correctes, mais il est généralement variable d'une substance à une autre, et oscille de  $\frac{1}{4}$  à  $\frac{3}{5}$ . Dans les corps dits « anisotropes <sup>(1)</sup> », il est supérieur à l'unité ; c'est  $\sigma = 1,47$  à  $1,65$  pour les fils de soie (de cocon). Le module de rigidité est donc compris entre  $\frac{E}{2\left(1 + \frac{1}{4}\right)}$  et  $\frac{E}{2\left(1 + \frac{3}{5}\right)}$ ,

soit entre  $\frac{2}{5}E$  et  $\frac{5E}{16}$ .

Le système du  $\frac{\text{kg.}}{\text{mm}^2}$ , employé pour évaluer  $E$ , convient évidemment à  $G$  ; mais on voit que le kilogramme s'exprimant par  $981 \times 1.000$  dynes ou  $0,981 \times 10^8$  dans le système C. G. S., et le millimètre carré étant 100 fois plus petit que le centimètre carré, ce système est  $0,981 \times 10^8$  fois plus faible que le système C. G. S. Il s'ensuit que :

$$\gamma = \frac{\pi G}{32} = \frac{\pi \times 0,981 \times 10^8}{32} = 0,9631 \times 10^7,$$

et que les valeurs de  $\gamma$  dans ce dernier système se déduisent de  $G$  en écrivant :

$$\gamma = G \times 0,963 \times 10^7.$$

L'application des lois de la torsion a conduit à creuser les arbres des machines, ce qui est une diminution de poids, une économie de matière, sans préjudice pour la solidité.

(1) Quand les éléments de volume d'une substance varient de propriétés suivant leur orientation, cette substance est homogène et anisotrope ; sinon elle est isotrope.

**49. Cisaillement.** — On a réservé le nom de *cisaillement* au glissement transversal qui se produit quand un effort agit dans le plan d'encastrement. C'est, par exemple, l'effort des cisailles coupant une barre : les deux parties se séparent en glissant transversalement et tendent à passer l'une sur l'autre. L'effort de cisaillement est dit *effort tranchant*.

On peut encore citer le cisaillement dû à l'action du poinçon, de l'emporte-pièce. Il y a donc une *résistance transverse* de la matière, latérale, tangentielle, qui s'oppose au glissement. C'est elle qui empêche les filets de vis de se briser. La déformation par torsion est un cisaillement. On évalue à 23 kilogrammes par centimètre carré l'effort de rupture par cisaillement sur le bois de sapin.

**50. Altérations de l'élasticité.** — La « fatigue d'élasticité », que nous avons signalée plus haut, résulte de causes variées :

1° L'état antérieur de la substance, le travail qu'elle a eu à fournir, la durée d'action des efforts supportés et l'âge de cette substance ;

2° La nature propre de la matière, suivant que la déformation y détermine des « frottements intérieurs », persistants ou non, qu'il s'agit de matière *visqueuse*, comme la plupart des substances organiques.

3° Les variations brusques de la *température*.

4° Les *chocs* et les *vibrations*, dont les efforts s'accumulent dans la matière et en entraînent souvent la rupture.

**51. Rôle de l'élasticité et travail ou énergie élastiques.** — La propriété fondamentale de l'élasticité des corps est d'y emmagasiner, d'y accumuler les effets d'impulsions très brèves, ceux des chocs et des vibrations ; des énergies très faibles s'additionneront pour former une quantité d'énergie très appréciable. C'est ce que nous allons démontrer, et, tout d'abord, nous évaluerons le *travail de déformation ou énergie élastique*, c'est-à-dire le produit de l'effort par la grandeur de la déformation. On a :

1° *Travail de traction ou de compression :*

$$\mathfrak{C} = \frac{1}{2} F \times l = \frac{1}{2} \frac{F^2 L}{ES} = \frac{SEl^2}{2L}$$

(équations se déduisant de la formule des allongements (1) et d'ailleurs très faciles à établir directement).

2° Travail de flexion :

$$\mathfrak{E} = \frac{1}{2} F \times y = \frac{2}{3} \frac{F^2 L^3}{\pi r^4 E} \text{ (tige cylindrique);}$$

3° Travail de torsion :

$$\mathfrak{E} = \frac{1}{2} M \times \theta = \frac{M^2 L}{\pi r^4 G} \text{ (tige cylindrique).}$$

Ainsi l'énergie élastique est une forme de l'énergie (§ 39) équivalente aux autres. Un *choc* apporterait, dans un corps élastique, une certaine quantité d'énergie, l'organe prenant une déformation déterminée par sa section, sa longueur et son module de Young. Cette énergie est transmise, plus ou moins intégralement, par le corps élastique, et surtout *plus ou moins lentement*: de sorte que si plusieurs chocs se succédaient rapidement, ils seraient transformés en une *action continue et sans secousses*. C'est ainsi que Marey (1) fit application de *liens élastiques* à la traction des voitures et montra, au *dynamomètre*, qu'une économie de 26 0/0 pouvait être réalisée sur le travail dépensé: les chocs, ne se transmettant pas aux épaules de l'homme, ne l'obligent pas à des efforts excessifs, et ils lui épargnent des sensations douloureuses. Le travail moteur du cœur est, de même, rendu régulier et économique; telle est aussi la loi de l'activité respiratoire, etc. Une expérience

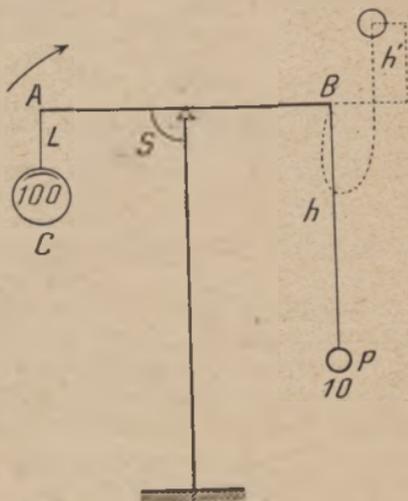


FIG. 82.

intéressante de Marey mérite d'être rapportée : AB est le fléau d'une balance (fig. 82); on attache en A une sphère de

(1) Trav. de Labor., 1<sup>re</sup> année, p. 1; 1878.

100 grammes, en B une boule de  $p = 10$  grammes, retenue par un fil de longueur  $h$ ; le fléau est maintenu horizontal en l'appuyant à un encliquetage spécial S, de sorte qu'il ne pourra se mouvoir que dans le sens de la flèche; en soulevant et laissant tomber d'une hauteur  $h'$  la petite boule  $p$ , le choc ne déterminera aucun mouvement du fléau.

Remplaçons le fil de la sphère C par un fil élastique : le fléau se déplacera sous le choc répété de la petite boule; c'est un exemple très net de transmission et d'accumulation du travail des chocs, si rapide, qui, en quelque sorte, s'organise une tension capable de vaincre le poids de la sphère et de lui imprimer un certain déplacement.

La tension ainsi produite résulte du travail élastique du fil; on a, en effet, comme travail de chute de la boule  $p$ ,  $p(h' + h + l)$ , en désignant par  $l$  l'allongement du fil L, et le travail élastique est  $\frac{SEl^2}{2L}$ , L étant la longueur du fil élastique.

De l'égalité :

$$p(h' + h + l) = \frac{SEl^2}{2L},$$

on tire :

$$l = \frac{Lp}{SE} + \sqrt{\frac{L^2p^2}{S^2E^2} + \frac{2Lp(h' + h)}{SE}},$$

et comme de la formule connue  $l = \frac{FL}{SE}$  on déduit la valeur de la tension F, soit  $F = \frac{lSE}{L}$ , on a donc, en remplaçant :

$$F = p + \sqrt{p^2 + 2p \frac{ES(h' + h)}{L}}.$$

Ce résultat montre, d'une part, qu'on peut augmenter la hauteur de chute de manière à rendre F supérieur au poids de la sphère; et, d'autre part, que cette tension F dépend du module d'élasticité E, c'est-à-dire de la nature du fil. En choisissant un fil de module faible, la déformation s'opérera dans un temps fini, la tension sera la même tout le long du fil et soulèvera la sphère. Si le fil n'était pas élastique, s'il était inextensible, le choc le casserait ou donnerait lieu à des vibrations sans effet utile.

On vérifierait, par exemple, qu'un fil de caoutchouc de 10 centimètres et 5 millimètres carrés de section aurait une tension de 102 gr. environ, si le choc était produit par un poids de 50 gr. seulement tombant d'une hauteur totale de 50 centimètres.

Les vibrations élastiques atteignent, parfois, une période qui les rend dangereuses; on remarquera, du reste, par la formule ci-dessus, que les tensions sont d'autant plus fortes que la substance est plus dure, que  $E$  est plus grand; en outre un corps a une *période propre*; si les impulsions qu'il reçoit ont une période égale ou sensiblement égale — s'il y a *résonance*, en un mot, — alors l'élasticité du corps sera vaincue; il pourra se briser.

De là cette habitude de faire rompre le pas aux troupes en marche sur un pont; de là aussi tant d'applications des lois précédentes soit pour utiliser l'accumulation des chocs, soit pour en éviter les conséquences dangereuses.

**52. Machines.** — Les machines sont des systèmes employés à équilibrer les forces appelées *forces résistantes* ou *résistances*, ou surtout à les déplacer au moyen d'autres forces appelées *forces mouvantes* ou encore *puissances*. A l'état statique, les puissances sont donc égales aux résistances; elles leur sont supérieures à l'état dynamique.

Une *machine* est dite *simple* quand un seul organe la constitue, avec certaines liaisons; elle est *composée* — comme le sont toutes nos machines industrielles — quand il y entre plusieurs machines simples.

Les parties d'une machine sont généralement assujetties à des liaisons pour n'avoir qu'un *seul mouvement possible*, pour que ce mouvement soit défini par une seule équation. Si, par exemple, elle ne tourne qu'autour d'un axe, ou glisse le long de cet axe, l'angle de rotation ou la valeur de la translation définissent le mouvement; l'une ou l'autre de ces grandeurs est le « paramètre » qu'il faut et qu'il suffit de connaître.

Les machines sont donc des « systèmes à liaisons complètes », c'est-à-dire tels que tous leurs points sont déterminés par un paramètre unique.

**53. Machines simples.** — On donne ce nom au *levier* (fig. 84) au *plan incliné* (fig. 88), à la *poulie* (fig. 92), au *treuil* (fig. 91), au *coin* (fig. 93), à la *vis*. Les conditions d'équilibre de ces machines, sous les forces qui leur sont appli-

quées, forces extérieures et forces de liaison (§ 16) sont données par un théorème important, celui de *d'Alembert* ou des *travaux virtuels*. On considère qu'un point quelconque  $M$  du système se déplace en  $M'$  d'une façon « compatible avec les liaisons » ; il produit un travail qualifié de *virtuel*, pour le distinguer du travail réel que les forces pourraient lui faire accomplir, soit suivant  $MM'$  (fig. 83). Le théorème de *d'Alembert* dit :

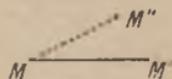


FIG. 83.

« La condition nécessaire et suffisante de l'équilibre d'un système est que, pour tout déplacement virtuel de ce système compatible avec les liaisons, la somme des travaux virtuels des forces données soit nulle. »

Mais le travail des liaisons, en l'absence de tout frottement, est nul ; ainsi un point mobile sur une surface donne lieu à une force de liaison normale (réaction), et la force étant perpendiculaire au déplacement fait un travail nul (§ 30). Il ne reste donc à considérer que le travail des forces extérieures ; il doit être aussi nul, d'après le théorème de *d'Alembert* : en effet, dans un système en équilibre et à liaisons, nous savons que toutes les forces ont *deux résultantes* (§ 17), dont le travail doit être nul, puisqu'elles sont toutes deux nulles. Comme le travail virtuel de l'une — celles des liaisons — est nul, celui de l'autre — résultante des forces externes — doit être également nul. Appliquons ce théorème aux machines simples.

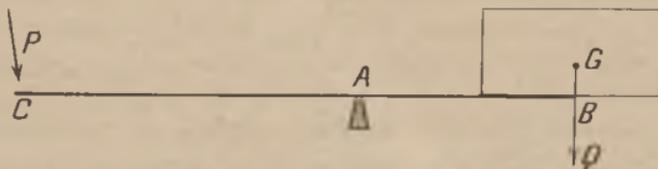


FIG. 84.

1° *Levier*. — Un levier est une barre rigide, mobile autour d'un point fixe appelé appui (A) ; la résistance  $Q$  à vaincre est une force appliquée à une extrémité  $B$  ; la puissance  $P$  est à l'autre extrémité  $C$  (fig. 84). C'est le type de levier dit

*inter-appui* (A placé entre B et C) ou du *premier genre*. Mais il peut être *inter-résistant* ou du *deuxième genre*, ou enfin

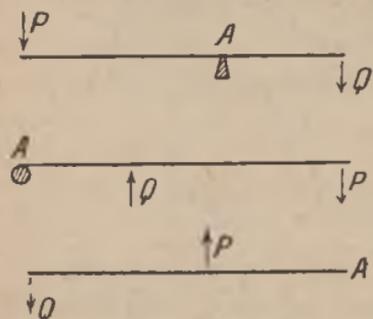


FIG. 85.

*inter-puissant* ou du *troisième genre* (fig. 85). Du premier type sont les ciseaux, cisailles de ferblantiers, tenailles de forgerons, outils du tourneur, sécateur, etc. Du deuxième type sont les cisailles à tôle, couteau de boulanger, casse-noisettes, rame ou aviron, brimbales des pompes, brouette, touches de pianos, de machines à écrire, etc. Et

du troisième type, la pelle des chauffeurs et des terrassiers, les marteaux frontaux, pincettes de foyer, pédale du remouleur, machine à coudre, et les nombreux leviers (pour la plupart) de l'économie animale.

Les distances de point d'appui aux directions de la puissance

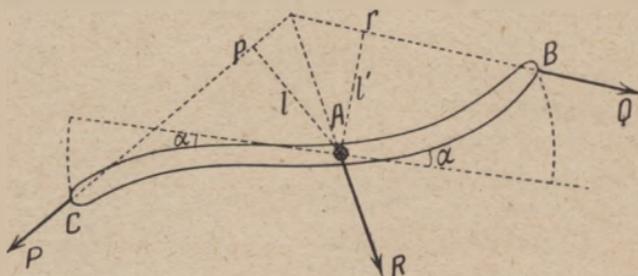


FIG. 86.

et de la résistance sont les *bras de levier*. Dans le levier CAB (fig. 86), les bras sont  $Ap$  et  $Ar$ , et non point  $AC$  et  $AB$ . La résultante  $R$  sera appliquée au point d'appui  $A$ .

Quant à la condition d'équilibre, le travail de la puissance pour un déplacement virtuel correspondant à l'angle  $\alpha$  sera :

$$\mathcal{E}_P = \text{moment de } P \times \text{angle } \alpha = P \times Apa.$$

Le travail virtuel de la résistance sera :

$$\mathcal{E}_2 = \text{moment de } Q \times \alpha = Q \times Ara.$$

D'après le théorème de Alembert, on a :

$$P \times Ap\alpha = Q \times Ara,$$

ou, en appelant  $l$  et  $l'$  les bras de levier :

$$Pl = Ql', \quad \text{soit encore : } \frac{P}{Q} = \frac{l'}{l}.$$

Ce que l'on exprime ainsi : le travail moteur  $Pl\alpha$  est égal au travail résistant  $Ql'\alpha$ ; ou le moment moteur  $Pl$  est égal au moment résistant  $Ql'$ ; ou enfin : la puissance et la résistance sont en raison inverse de leurs bras de levier.

Il résulte de cette dernière expression que si  $l = 10l'$ , la puissance pourra être 10 fois plus petite que la résistance et lui faire équilibre; les chemins parcourus seront inverses des forces. D'où l'adage : « Ce que l'on gagne en force, on le perd en vitesse (Galilée). » On gagne aussi en force dans les leviers inter-résistants, puisque la puissance y possède un bras toujours plus grand que celui de la résistance. Mais on perd en force dans les leviers inter-puissants où les longueurs des bras sont renversées; on notera que, dans ce dernier cas, la machine déplace la résistance avec une amplitude d'autant plus grande que le bras de la puissance sera plus court.

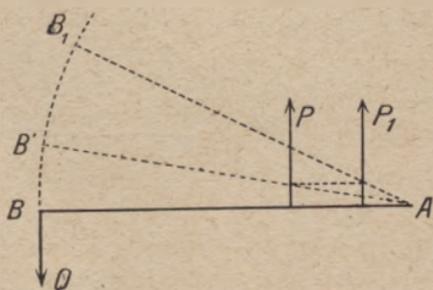


FIG. 87.

La position  $P$  donne le déplacement  $BB'$ ; la position  $P_1$  donnera  $BB_1$  beaucoup plus grand (fig. 87). On comprend que pour réaliser cette augmentation d'amplitude il soit nécessaire de « perdre en force ».

54. 2° *Plan incliné*. — C'est un plan rigide que nous supposerons parfaitement poli. Le fardeau (résistance  $Q$ )

placé sur ce plan a une composante normale  $N$  que détruit la liaison, et une composante parallèle au plan,  $F$ . La puissance  $P$ , pour équilibrer le fardeau, sera :  $P = F$ . Il est aisé de voir que  $F$  dépend de l'angle  $\alpha$  ou de l'inclinaison du plan ; on a :  $F = Q \sin \alpha$  (angles à côtes perpendiculaires).

Si la puissance agit parallèlement au plan, pour un déplacement virtuel quelconque  $r$ , on aura :

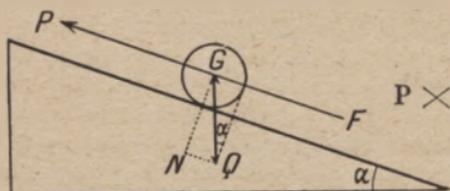


FIG. 88.

$$P \times r = F \times r = Q \times r \sin \alpha,$$

d'où :

$$P = Q \sin \alpha \text{ (fig. 88)}$$

Mais cela suppose que  $P$  et  $F$  se trouvent dans un même plan. Or  $P$  peut avoir une direction quelconque faisant un angle  $\varphi$  avec la normale (fig. 89), direction telle, cependant, que la résultante de  $P$  et  $Q$  soit normale au plan incliné et y maintienne le fardeau. Comme  $Q$  est déjà dans le plan de cette résultante (dans  $AOB$ ), la puissance doit donc aussi se trouver dans la section principale  $AOB$ . Quant à la valeur de  $P$ , on l'obtient facilement, en menant  $GP_1$  égal et parallèle à  $P$ , dans le même sens, et en projetant  $P_1$  sur la direction de la composante  $F$  du fardeau. On a :

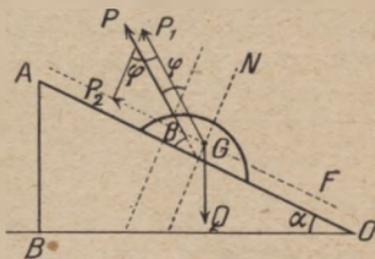


FIG. 89.

$$P_2 = P_1 \sin \varphi = P \sin \varphi \text{ (angles alternes-internes) } (1).$$

Et puisque  $F = Q \sin \alpha$ , on a, pour l'équilibre :

$$P \sin \varphi = Q \sin \alpha ; \quad \text{d'où} \quad P = Q \frac{\sin \alpha}{\sin \varphi}.$$

(1) Au lieu de  $\sin \varphi$ , on pourrait prendre  $\cos P_1 G P_2$  ou angle formé par la direction de la puissance sur celle du plan incliné.

De sorte que, pour un fardeau donné, la puissance augmente comme le sinus de l'angle d'inclinaison du plan, ou comme le cosinus de sa propre inclinaison sur ce plan, car  $\sin \varphi = \cos \beta$ . on voit que si  $\beta = 0$ ,  $\cos \beta = 1$ , ce qui conduirait à l'expression ci-dessus  $P = Q \cos \alpha$ .

Introduisons, maintenant, la force de frottement de glissement  $\Phi$ , en nous rappelant que le coefficient de glissement est  $f = \tan \varphi$  (§ 39),  $\varphi$  étant l'angle de frottement; cet angle est donné par la normale  $N$  et la résultante  $R$  de la pression et du frottement. En pratique  $\varphi$  s'obtient en inclinant le plan jusqu'au glissement de la surface  $SS'$ ; c'est alors la valeur que prendra l'angle  $\alpha$  du plan. Donc, si nous appliquons une puissance  $P$  au fardeau posé sur le plan, nous ne pourrons le remorquer qu'avec une force supérieure à  $F + \Phi$ . Or la composante utile de la traction est  $P \cos \beta$ , parallèle au plan. La pression (normale)  $N$  est diminuée de la composante normale de  $P$ , qui est  $P \sin \beta$ . Comme  $N = Q \cos \alpha$ , la pression du fardeau sera :

$$Q \cos \alpha - P \sin \beta,$$

et le frottement

$$\Phi = f(Q \cos \alpha - P \sin \beta).$$

Enfin, la composante tangentielle de la résistance est  $Q \sin \alpha = F$ . Donc on doit avoir, au moins :

$$P \cos \beta = Q \sin \alpha + f(Q \cos \alpha - P \sin \beta).$$

On en déduit :

$$P = Q \frac{\sin \alpha + f \cos \alpha}{\cos \beta + f \sin \beta} = Q \frac{\sin(\alpha + \varphi)}{\cos(\beta - \varphi)} \quad (1).$$

$P$  est minimum pour  $\cos(\beta - \varphi)$  maximum, ou  $\beta = \varphi$ . Alors

$$P = Q \sin(\alpha + \varphi);$$

on devra tirer dans une direction faisant l'angle  $\beta = \varphi$  avec le plan incliné (fig. 90).

(1) On a remplacé  $f$  par  $\frac{\sin \varphi}{\cos \varphi}$  et effectué une transformation simple (voir un cours de trigonométrie).

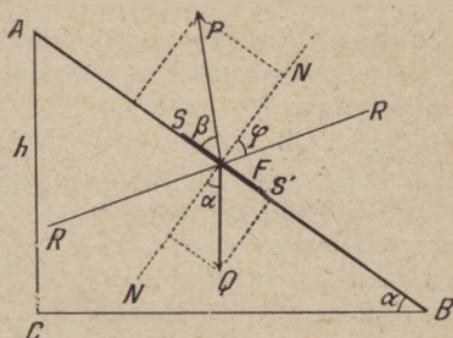


FIG. 90.

Pour laisser le fardeau glisser tout simplement sur le plan sous l'action de la pesanteur, on considérera l'équilibre entre la composante  $F = Q \sin \alpha$  et le frottement  $\Phi = fN = fQ \cos \alpha$ . La force de glissement sera :

$$F - \Phi = Q(\sin \alpha - f \cos \alpha).$$

Remplaçant  $f$  par  $\frac{\sin \varphi}{\cos \varphi}$ , on écrira :

$$F - \Phi = Q \frac{\sin \alpha - \varphi}{\cos \varphi}.$$

Suivant que  $\alpha$  sera inférieur ou supérieur à  $\varphi$ , le mouvement sera retardé ou accéléré.

Le plan incliné sert dans les petits chemins de fer de carrière, dans les gares et les magasins pour faire glisser les colis, dans le *haquet* qui sert au chargement des tonneaux, etc.

Ajoutons que la puissance utile étant  $P \cos \beta$  et la résistance  $Q \sin \alpha$  pour un déplacement virtuel du corps,  $l$ , on aura l'égalité du travail moteur et du travail résistant :

$$Pl \cos \beta = Ql \sin \alpha.$$

Si  $l$  était le parcours total AB, on a :

$$AC = AB \sin \alpha = l \sin \alpha = h;$$

De sorte que :

$$Ql \sin \alpha = Qh,$$

et le travail sera égal à celui de la chute du poids  $Q$  d'une hauteur  $h$ .

55. 3<sup>o</sup> *Treuil*. — A l'aide de la manivelle AB on exerce une puissance  $P$  perpendiculaire au bras  $BB'$ , c'est-à-dire tangente à la circonférence de rayon  $BB' = R$ . La résistance  $Q$  est à l'extrémité d'une corde enroulée sur le cylindre  $K$ , dont le rayon est  $r$ .

Pour une rotation virtuelle  $\alpha$  de la manivelle, le travail de la puissance est  $PR \times \alpha$ ; celui de la résistance est  $-Qr \times \alpha$

(travail négatif). La condition d'équilibre est :

$$Pr = Qr,$$

d'où

$$P = Q \frac{r}{R} \text{ (fig. 91).}$$

Le treuil n'a qu'un *degré de liberté* : il tourne autour d'un axe fixe.

Au lieu de manivelle, on emploie parfois des barres fixées dans le cylindre normalement à l'axe (cas du haquet) ou bien une roue à grand rayon et avec échelons (*roue à chevilles* ou treuil des carriers), ou enfin on dresse verticalement le treuil comme dans le *cabestan*.

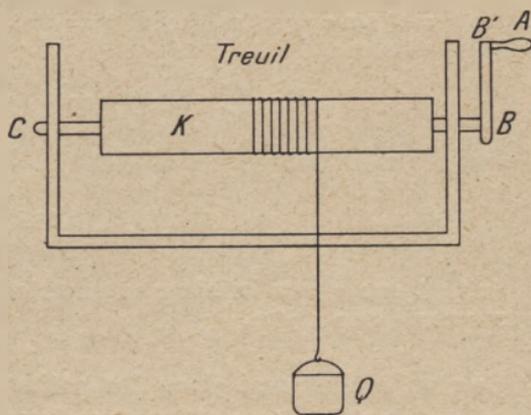


FIG. 91.

56. 4° Poulie. — Nous examinerons la *poulie fixe*, roue circulaire

tournant autour d'un axe  $O$  qui passe par son centre et qui est perpendiculaire à son plan ; l'axe est supporté par une pièce en forme d'U renversé appelée *chape*,  $C$ . La circonférence de la roue est creusée d'un sillon ou *gorge*, dans lequel passe une corde.

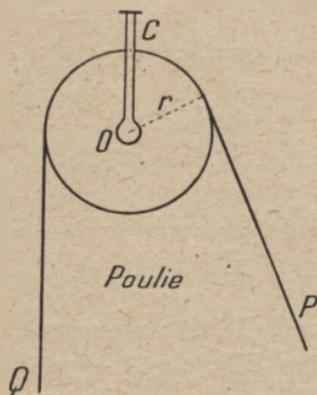


FIG. 92.

Pour une rotation virtuelle  $\alpha$  de la roue, le travail de la puissance est  $Pr\alpha$  ; celui de la résistance —  $Qr\alpha$  ; la condition d'équilibre est donc :

$$P = Q \text{ (fig. 92).}$$

La puissance doit être égale à la résistance.

57. 5° *Coin*. — Le coin est un prisme triangulaire qui sert à écarter l'une de l'autre deux portions d'un corps, par exemple pour fendre le bois à brûler.

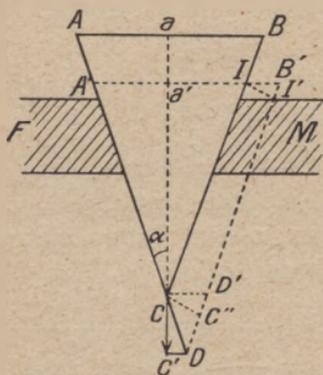


FIG. 93.

La puissance  $P$  est appliquée sur la tête  $AB$ , tandis que l'angle du coin,  $C$ , est engagé dans la fente que l'on veut agrandir.

Supposons qu'il s'agisse d'écarter une portion mobile  $M$  d'un corps fixe  $F$ , en enfonçant le coin. Quand celui-ci s'avance de  $AA'$ , la résistance de la partie  $M$  a reculé de  $IB'$ . Or la puissance est perpendiculaire à  $AB$ , et la résistance à

$BC$  : donc la première s'est avancée de  $CC' = aa'$ , et la deuxième de  $II' = CC'$ . Le principe des travaux virtuels donne :

$$P \times CC' = Q \times CC' \quad \text{ou} \quad \frac{P}{Q} = \frac{CC'}{CC'} \quad (\text{fig. 93}).$$

En menant la parallèle  $CD'$ , il est aisé de voir que les triangles rectangles  $CC'D'$  et  $CC'D$  sont semblables (angle aigu égal); d'où :

$$\frac{CC'}{CC'} = \frac{CD'}{CD}.$$

Et dans les triangles semblables  $CDD'$  et  $A'DB'$ , on a :

$$\frac{CD'}{CD} = \frac{A'B'}{A'D} = \frac{AB}{AC}.$$

Par conséquent :

$$\frac{P}{Q} = \frac{AB}{AC}.$$

La puissance est à la résistance comme la tête du coin est à son côté.

On voit aussi que :

$$\frac{AB}{AC} = \frac{2Aa}{AC},$$

si le triangle ou le prisme est isocèle ; or

$$\frac{Aa}{AC} = \text{tang } \alpha ;$$

donc :

$$\frac{AB}{AC} = 2 \text{ tang } \alpha \quad \text{et} \quad \frac{P}{Q} = 2 \text{ tang } \alpha.$$

Plus l'angle  $\alpha$  est petit, plus le coin est avantageux.

Dans la plupart des instruments, basés sur le coin, l'angle est d'autant plus petit qu'ils doivent être tranchants et propres à diviser (burin, canif, couteau, rasoir, plane, ciseau, gouges, rabot, hache, etc.), et le prisme est isocèle.

58. 6° *Vis*. — La vis s'engage dans son écrou par un mouvement de rotation ; elle avance d'un *pas* — translation ou déplacement linéaire  $h$  — pour une rotation  $2\pi R$  ou un tour entier. Elle avancerait de  $h \times \frac{2\pi R}{\alpha R}$  ou  $\frac{\alpha h}{2\pi}$  pour une fraction de tour  $\alpha R$  correspondant à l'angle  $\alpha$ . De sorte que le travail moteur (de la puissance) sera :

$$P \times R \times \alpha$$

si le levier d'action est le rayon  $R$  ; le travail résistant sera :

$$- Q \frac{\alpha h}{2\pi}.$$

La condition d'équilibre donne :

$$P \alpha R = Q \alpha \frac{h}{2\pi} ; \quad \text{d'où} \quad P = Q \frac{h}{2\pi R}.$$

Ainsi on réduirait considérablement la puissance en agissant sur un grand levier fixé dans la tête d'une vis à *pas* très petit. C'est ce qui est réalisé dans la *presse à vis*, par exemple.

59. **Machines industrielles.** — Les machines qu'emploie l'industrie sont composées de machines simples. Leur but est l'exécution de certains travaux. Elles comprennent, généralement, trois parties :

1° Le *récepteur* sur lequel agit la *force motrice* ; cette force

est une *pression*; ainsi la pression de la vapeur est une force motrice, tandis que la vapeur elle-même, c'est-à-dire l'*agent*, est le *moteur* (latin *movere*, mouvoir); le moteur est, souvent, une *machine dite motrice*, mise en rapport avec le récepteur ou *machine réceptrice*. De là le nom de *moteurs* donné aux machines qui développent la puissance ou la force motrice.

Suivant la nature du moteur, on a distingué les machines en *thermiques* (vapeur, gaz, air chaud, pétrole, etc.), *hydrauliques* (chutes d'eau, houille blanche ou glaciers), *pneumatiques* (air comprimé, vent, air raréfié), *électriques*, *élastiques* ou *gravifiques* (travail de la pesanteur). Les *moteurs animés* (homme et animaux) utilisent les *efforts musculaires*, mais la nature de l'agent qui produit ces efforts n'est pas connue avec certitude (voir § 364); les membres de l'animal sont les récepteurs.

2° L'*opérateur* ou l'*outil* est cette partie d'une machine qui effectue le travail définitif, travail de force ou travail de vitesse. L'outil se trouve agencé en vue du résultat que l'on désire obtenir; son mouvement est *déterminé* par cet agencement même; il est — si on peut dire — *aveugle*, comparé au mouvement *intelligent* de l'homme et même à celui de l'animal.

3° Des *mécanismes* ou *communicateurs* transmettent le mouvement, de proche en proche, du récepteur à l'opérateur.

60. Le principe qui régit le travail des machines est celui des *forces vives* (§ 32). Soit une machine en mouvement depuis l'instant  $t_1$  jusqu'à l'instant  $t_2$ . Dans cet intervalle, les puissances ont fait un travail moteur  $\mathfrak{E}_m$ ; les résistances ont fait un travail  $-\mathfrak{E}_r$ ; et nous savons que la machine, qui avait une puissance vive  $\frac{1}{2}mv_1^2$ , a maintenant une puissance vive  $\frac{1}{2}mv_2^2$ ; le travail moteur est donc égal au travail résistant et à l'accroissement de puissance vive  $\frac{1}{2}(mv_2^2 - mv_1^2)$ . On écrit alors l'équation :

$$\mathfrak{E}_m = \mathfrak{E}_r + \frac{1}{2}(mv_2^2 - mv_1^2).$$

La machine *démarre*, elle se *met en train* en absorbant cette quantité d'énergie  $\frac{1}{2} m(v_2^2 - v_1^2)$ . Mais, un peu après cette *période d'établissement*, cette *mise en marche*, la vitesse devient uniforme ; il n'y a plus d'inertie à vaincre, et le mouvement se poursuit par équilibre entre  $\mathcal{E}_m$  et  $\mathcal{E}_r$  ; d'où :

$$\frac{1}{2} (mv_2^2 - mv_1^2) = 0, \quad \text{ou} \quad v_2 = v_1 ;$$

ce qui est la loi du mouvement *uniforme*, ou de la *marche normale* ; c'est évidemment la marche économique : on fournit un travail moteur exactement égal au travail résistant. La vitesse uniforme est dite *vitesse normale ou de régime*.

A l'*arrêt* de la machine,  $\mathcal{E}_m$  est tout de suite nul, et nous devons retomber sur la vitesse initiale  $v_1$  ; mais l'inertie, qui avait absorbé la quantité d'énergie  $\frac{1}{2} m(v_2^2 - v_1^2)$ , la restitue et entretient pour quelque temps le travail de la machine. Il apparaît donc très clairement que l'inertie est ce qui empêche la vitesse de passer *brusquement* d'une vitesse finie à une autre vitesse finie, et une machine de s'*arrêter instantanément*.

Si, d'autre part, on remarque que le travail résistant total  $\mathcal{E}_r$  comprend le *travail utile*  $\mathcal{E}_u$  de la machine, c'est-à-dire proprement *l'ouvrage*, et un *travail inutile*  $\mathcal{E}_i$  dû aux forces de frottement, aux résistances passives dont on peut réduire la valeur sans jamais l'annuler, on aura pour équation de la marche normale :

$$\mathcal{E}_m = \mathcal{E}_r = \mathcal{E}_u + \mathcal{E}_i.$$

Les irrégularités de marche des machines usuelles reconnaissent pour causes la présence d'organes à mouvements *alternatifs*, l'*intermittence* d'action de la force motrice ou de la résistance (pilons, marteaux, etc.). On les atténue en modérant les *écarts de vitesse* grâce aux *volants*, en réglant l'admission de la vapeur et des gaz combustibles par l'emploi des *soupapes* et des *valves d'admission* ; on s'ingénie pour donner à l'action des *régulateurs* une sensibilité et une précision extrêmes ; on évite les chocs et les trépidations... L'industrie a presque satisfait à toutes ces exigences de l'équilibre dynamique des machines.

De l'équation

$$\mathcal{E}_m = \mathcal{E}_u + \mathcal{E}_i,$$

on déduit le rapport :

$$\frac{\mathcal{E}_u}{\mathcal{E}_m} = \frac{\mathcal{E}_m - \mathcal{E}_i}{\mathcal{E}_m} = 1 - \frac{\mathcal{E}_i}{\mathcal{E}_m}.$$

Ainsi la machine ne « réalise » qu'une fraction, *toujours inférieure à l'unité*, du travail moteur qu'elle reçoit. Cette fraction est appelée son *rendement*, et  $\frac{\mathcal{E}_i}{\mathcal{E}_m}$  le *coefficient de perte*. Le « mouvement perpétuel » aurait lieu si  $\frac{\mathcal{E}_i}{\mathcal{E}_m} = 0$ , ce qui est impossible dans la pratique.

**61. Puissance des moteurs.** — On appelle *puissance* d'un moteur la quantité de travail ou d'énergie mécanique développée en une *seconde* de temps. [Il est fâcheux que le terme puissance soit également synonyme de force.] C'est là une caractéristique permettant de comparer entre eux divers moteurs, ceux, principalement, dont le travail est supposé *continu* pendant une longue durée.

L'unité pratique de puissance est le *poncelet*, qui vaut 100 kilogrammètres par seconde. Mais l'unité la plus répandue est le *cheval-vapeur* (symbole H.P., de *horse-power* : puissance d'un cheval, en anglais), qui vaut 75 kilogrammètres. On emploie aussi le *watt*, pour les moteurs électriques, le watt étant une unité de puissance électrique valant environ  $0^{kgm}, 102$ , le *kilowatt* (1.000 watts) correspond à une puissance de 102 kilogrammètres (voir sur les unités § 65); le H.P. vaut 735,75 watts.

Chez les moteurs animés, le travail n'est pas continu à cause des phénomènes de *fatigue* (§ 93); il est nécessairement *périodique*, de sorte que la journée de travail est coupée d'un certain nombre de *haltes* ou *intervalles de repos*. Considérant le total du travail effectué et la durée totale aussi des *périodes* d'activité, le quotient de ces deux quantités indiquera la puissance utile de l'homme ou de l'animal.

La puissance est, en un mot, la *vitesse de production de l'énergie*.

Dans la pratique industrielle, il est plus commode de rapporter la quantité de travail à la durée de la journée, haltes et repos compris.

L'accroissement de puissance des moteurs usuels ne va pas sans une augmentation de leur masse : d'où la notion de *puissance massique* ou puissance par unité de poids. Ainsi la puissance massique des machines à vapeur est de  $\frac{1}{100}$ , soit *un cheval-vapeur* par 100 kilogrammes de poids. Les moteurs dits à *combustion interne* (à air carburé) donnent un cheval par 12 — 7 — 6 et même 3<sup>kg</sup>,500, et on comprend dans ce poids celui des cylindres à combustion et de leurs accessoires (carburateur, pompe à huile, magnéto).

Ces beaux résultats ont été atteints grâce surtout à la vitesse de 1200 à 2.400 coups de piston par minute. Dans le moteur *Gnôme*, où plusieurs cylindres sont disposés en étoile, on est arrivé à 1 kilogramme par cheval-vapeur, tandis que la puissance effective développe de 36 à 100 HP.

Ces moteurs extra-légers, utiles particulièrement à l'*aviation*, nécessitent beaucoup de soins et de précautions : refroidissement des cylindres par l'eau ou par une ventilation énergique, résistance parfaitement sûre des matériaux employés, fréquence des explosions avec admission régulière des gaz carburés. Enfin de tels moteurs marchent tout au plus 400 heures (type *Gnôme*) : c'est une vie éphémère.

La puissance doit s'adapter à l'effet qu'on désire obtenir, augmenter ou diminuer avec les résistances à vaincre, c'est-à-dire avec la *charge* du moteur. Quand il s'agit de faibles puissances, on interrompt périodiquement l'arrivée des gaz, on retarde les explosions, en laissant au volant le soin de maintenir une puissance vive régulière et suffisante; c'est la méthode du « tout ou rien ». Mais, pour les grandes puissances, on recourt à un réglage qualitatif tel que la richesse des gaz combustibles se modifie en fonction du travail à produire, et assure un régime d'équilibre entre la puissance motrice et les résistances à vaincre. De là des dispositions mécaniques infiniment compliquées et délicates, d'autant plus qu'en appauvrissant le mélange gazeux les combustions deviennent imparfaites; il est donc plus avantageux de

régler seulement la *vitesse* du moteur, sans arriver, cependant, à une vitesse tellement faible que le volant risque de s'arrêter aux « points morts » de la machine (§ 41).

La puissance des moteurs industriels varie de  $\frac{1}{10}$  HP. à 2.000 et même 3000 HP. Les petits moteurs élastiques — vrais jouets pour les amateurs d'aéronautique — donnent de  $\frac{1}{20}$  à  $\frac{1}{10}$  HP, mais ne marchent que quelques minutes à peine; ce sont de véritables fusées.

Les *moteurs animés* ont rarement une puissance supérieure à 1 HP (voir § 363).

**62. Dépense des moteurs.** — La *dépense* d'un moteur, c'est sa *consommation d'énergie*, soit en combustible pour les moteurs inanimés, soit en *aliments* pour les moteurs animés; le mot « dépense » emprunté à l'hydraulique où il désigne la quantité d'eau qui passe en une seconde, traduit cette idée ou plutôt cette image d'un « flux d'énergie ».

Le moteur est parcouru, traversé par ce flux énergétique, dont les aspects peuvent varier, se transformer. Ainsi, une réaction chimique équivalente à une quantité d'énergie  $Q$  alimente une machine électrique; celle-ci distribue dans un réseau *tout* ce qu'elle a reçu, en allumant des lampes à incandescence (A), en mettant en marche d'autres machines (B), en chargeant des accumulateurs (C), en décomposant des solutions de sels chimiques pour la galvanoplastie (D), et il se perd une certaine quantité d'énergie (E) par dégradation dans les fils de transmission. On doit avoir (§ 33) :

$$Q = A + B + C + D + E.$$

En exprimant en kilogrammètres toutes ces valeurs partielles, on voit que la dépense  $Q$  est l'équivalent d'un travail mécanique, et que les moteurs sont réellement des *transformateurs d'énergie*.

Sans doute, la dépense ou la consommation caractérise les moteurs en marche, à l'état de travail; et elle se répartit en une *dépense stricte* correspondant au travail utile, et une *dépense stérile* correspondant au travail inutile; mais on

peut imaginer que toute la dépense soit stérile et que l'énergie consommée se dégrade entièrement en chaleur : si, par exemple, un moteur actionne des pièces dont les surfaces sont pressées fortement les unes sur les autres (cas du frein de Prony, § 41), toute sa dépense sera stérile : elle sera absorbée par les frottements et se dissipera en chaleur. En outre, cette dépense, ce travail moteur, a servi à soutenir un poids à l'extrémité d'un levier ; il s'ensuit que de l'énergie peut se dépenser dans un *effort statique*.

La dépense d'un moteur en marche, et dans des conditions de vitesse données, indique la valeur de son travail ; celui-ci est la conséquence de celle-là et varie avec elle. Il n'en est pas ainsi chez les moteurs animés ; ils peuvent varier la grandeur de leur travail, la dépense se règle sur cette variation, et elle a lieu à *jeun* comme à l'état d'alimentation parfaite. Cette loi de dépenser pour combler exactement un déficit donne lieu à une dépense uniforme dans un travail uniforme ; elle crée un *régime permanent* et fait de l'animal un *système stationnaire*.

La combustion des flammes, le cours des rivières réalisent des systèmes stationnaires, recevant et perdant à tout instant la même quantité de fluide. La poésie a, depuis longtemps, fait du flambeau ou du fleuve l'image de la *vie*. « Nous sommes réellement, physiquement, comme un fleuve dont toutes les eaux coulent dans un flux perpétuel, écrivait Voltaire (1). C'est le même fleuve par son lit ... ; mais, changeant à tout moment son eau qui constitue son être, il n'y a nulle identité, nulle mêmeité pour ce fleuve ».

La dépense des moteurs n'est pas rigoureusement l'équivalent de leur travail utile, ainsi qu'on vient de l'expliquer. Un moteur thermique demande à être maintenu *en pression* pour être « au seuil de son fonctionnement » ; mais cette mise sous pression ne va pas sans des *fuites*, impossibles à éviter complètement ; et l'on doit compter avec le rayonnement des chaudières. Qu'il y ait ou non travail, les causes de pertes indiquées occasionnent une *dépense statique*, comme il convient de l'appeler.

(1) Voltaire, *Diction. philosophique* (art. *Identité*).

On en dirait autant des moteurs électriques, les pertes se produisant le long des câbles de transmission, par les contacts, les armatures, etc. (voir § 121).

La valeur de la dépense statique  $D_s$  est faible si on la compare à la *dépense dynamique*  $D_d$ , celle qui couvre strictement les frais du travail recueilli. Mais il n'en est pas ainsi chez l'animal; il est toujours en pression, car, s'il cessait un instant d'être en cet état, la vie elle-même s'arrêterait; sa dépense statique ne précède pas *de peu* le moment où il doit travailler; elle a constamment lieu; elle est *permanente*, car elle est *déterminée* — c'est le trait essentiel que nous avons déjà marqué — par des nécessités physiologiques, par un « but biologique » suivant l'expression de Wilhelm Ostwald : le *fonctionnement et l'intégrité des organes, la constance de la température* (animaux supérieurs). Et comme il s'agit d'un *travail intérieur* (§ 12), toute l'énergie dépensée statiquement se dissipera en *chaleur*.

Remarquons que la dépense dynamique n'est jamais rigoureusement équivalente au travail; celui-ci n'en représente qu'une fraction, et tout le reste se dégrade en chaleur. Ainsi, dans un travail exagéré, il y aurait une telle production de chaleur que l'animal pourrait en souffrir. Les bêtes que l'on « force » à la course, remarque Chauveau, meurent de cet excès de *thermogénèse* (1). Et ce même savant dénomma *travail* ou *énergie physiologique* la dépense totale de l'être vivant, celle qu'effectuent silencieusement et d'une façon permanente toutes ses cellules constitutives.

**63. Rendement des moteurs.** — Le rapport de l'énergie utile d'un moteur à l'énergie qu'il *dépense* est son *rendement*.

En écrivant (§ 60) :

$$\frac{\mathcal{E}_u}{\mathcal{E}_m} = \frac{\mathcal{E}_m - \mathcal{E}_i}{\mathcal{E}_m} = 1 - \frac{\mathcal{E}_i}{\mathcal{E}_m}.$$

(1) Alfred Chauveau (tirage à part de quatre notes parues dans *Comptes rendus Acad. Sciences*, 1907, augmentées d'une note explicative; chez Gauthier-Villars). Cet éminent physiologiste français fut au moins aussi profond que Claude Bernard. Né à Ville-neuve-la-Guyard (Yonne), en 1827, il est mort à Paris en 1917.

nous avons montré que le rendement ou le *coefficient d'effet utile* est toujours inférieur à l'unité. Les moteurs peuvent donc être comparés entre eux, et d'après leur puissance et d'après leur rendement.

L'énergie utile est, dans la pratique, celle que produit l'outil d'une machine ; l'énergie stérile  $\mathfrak{E}_i$  comprenant tous les déchets mécaniques, calorifiques qui signalent la transmission depuis le moteur jusqu'au récepteur. A ce point de vue, les deux termes du rendement sont  $\mathfrak{E}_u$  et D, en désignant par D la dépense totale du moteur, statique et dynamique. Ce sera le *rendement brut* :

$$r = \frac{\mathfrak{E}_u}{D} = \frac{\mathfrak{E}_u}{D_s + D_d}$$

L'industrie n'a généralement égard qu'à cette valeur  $r$ .

Mais il convient d'analyser ce coefficient. Le moteur, qui fait une dépense D, produit un travail supérieur à  $\mathfrak{E}_u$  ; c'est le travail du piston, dans un moteur thermique ; on l'évalue — sous le nom de *travail indiqué*  $\mathfrak{E}_n$  — en faisant un essai au frein de Prony (§ 41).

La machine, par ses *resistances*, n'a donc donné qu'une fraction  $\frac{\mathfrak{E}_u}{\mathfrak{E}_n}$  du travail indiqué ; c'est son *rendement organique* ; le *travail à vide*, pour que la machine prenne sa vitesse normale, absorbe ainsi  $(\mathfrak{E}_n - \mathfrak{E}_u)$ . Et le rapport de  $\mathfrak{E}_n$  à D sera le *coefficient de transformation* de l'énergie. Nous remarquerons aussi qu'en travaillant le moteur ne dépense que  $D_d$ , la quantité  $D_s$  ayant servi à le disposer au fonctionnement (§ 62) ; nous appellerons *rendement net* la valeur :

$$R = \frac{\mathfrak{E}_u}{D_d}$$

$D_s$  est considérable dans les cas des moteurs animés ; il faut donc le déduire de la dépense totale D pour connaître le *rendement net du muscle* ; et si l'on se donnait, dans chaque mode de travail, la valeur du rendement organique, on en déduirait le *coefficient vrai de transformation de l'énergie musculaire* :  $\frac{\mathfrak{E}_u}{D_d}$ .

64. La notion de rendement ne fut définie qu'assez tard. En 1819, Navier écrit : « Une machine est d'autant plus parfaite que son effet utile ( $\mathfrak{C}_u$ ) approche davantage de la quantité d'action <sup>(1)</sup> qu'elle consomme » <sup>(2)</sup>. Coriolis est plus précis, en 1829 : « Lorsque l'on veut donner une idée de la bonté d'une machine... on compare ce qu'elle rend avec ce qu'elle reçoit... La fraction qui exprime le rapport entre ces deux quantités est la mesure du *degré de perfection* de la machine <sup>(3)</sup> ».

Carnot <sup>(4)</sup>, en 1824, développa la théorie du cycle qui porte son nom et montra que le rendement, dans un tel cycle — on sait que les opérations thermodynamiques sont, alors, fermées et réversibles (§ 37) — est un *maximum*. Ce cycle, qui suppose dans un moteur thermique un mouvement infiniment lent des pistons, voisin de l'équilibre (conditions de réversibilité), et une absence de pertes calorifiques, est absolument *irréel*, ou, si l'on préfère, théorique. Il conduit à écrire :

$$R_{\max} = \frac{T - T'}{T} = 1 - \frac{T'}{T},$$

les températures absolues  $T$  et  $T'$  étant celles des sources chaudes (chaudière) et froide (condenseur). La valeur  $R_{\max}$  est une valeur idéale, une limite dont approchent les cycles réels, déterminés empiriquement. Carnot voulait tout simplement démontrer qu'une fraction, *toujours inférieure à l'unité*, représente au *maximum* le rendement en travail utile du travail moteur dépensé; il ruinait, par là, l'idée du « mouvement perpétuel ». Mais ses recherches théoriques dépassèrent un but si modeste; on l'a déjà dit plus haut (§ 37).

Ajoutons que les moteurs à combustion ne remplissent pas la condition de réversibilité, puisque les gaz, ayant fait explosion et changé de composition, ne sauraient reprendre leur *état initial*. Il s'ensuit que la question de rendement de Carnot ne se pose jamais, ne doit point se poser, si un changement d'état chimique, une *combustion* se place dans le cycle et le rend *irréversible*. C'est, en particulier, ce qui a lieu dans les opérations intérieures du *muscle*, comme Claudius le fit remarquer à Hirn <sup>(1)</sup>, dès l'aurore des études thermodynamiques.

(1) Quantité d'action était, alors, synonyme de *travail*.

(2) Navier, notes, p. 382, dans *Architecture hydraulique* de Belidor.

(3) Coriolis, *loc. cit.*, p. 344.

(4) Sadi-Carnot, *Reflexions sur la puissance motrice du feu* (l.c.).

Le rendement brut  $r$  d'une machine thermique varie de 7 à 14 0/0 : dans des circonstances exceptionnelles, Dweishauvers-Déry obtient 23 0/0, mais la surchauffe fut de 430°, soit

$$T = 430 + 273 = 703^\circ.$$

Dans les moteurs à explosion on produit, évidemment, des températures très élevées : de plus, en combinant la compression du mélange gazeux avec cette température très haute, on a pu avoir des rendements bruts de 30 à 40 0/0 : c'est le cas du moteur Diesel, et du canon, véritable moteur à explosion.

Des essais sur un moteur à gaz de 6,73 HP ont donné, par exemple, les résultats suivants (1) :

|   |            |
|---|------------|
| Chaleur transformée en travail indiqué..... | 48,70 0/0  |
| — perdue par rayonnement.....               | 7,50       |
| — — par réfrigération des cylindres.        | 46,00      |
| — — par les gaz rejetés (échappement).....  | 27,80      |
|   | <hr/>      |
|   | 100,00 0/0 |

Rendement organique : 73,6 0/0 ; d'où un rendement brut :

$$r = 48,70 \times \frac{73,6}{100} = 35,76 \text{ 0/0.}$$

**65. Systèmes d'unités.** — Les unités fondamentales de la mécanique sont celles de *temps*, *longueur* et *masse*.

L'unité de temps est la *seconde* ; il y en a 60 par *minute*, et il y a 60 minutes dans une *heure*, l'heure étant la  $\frac{1}{24}$  partie du *jour solaire moyen*.

L'unité de longueur est le *centimètre* (voir § 20). L'unité pratique est le *mètre* = 100 centimètres ; les multiples sont le *kilomètre* (1.000 mètres et le *myriamètre* 10.000 mètres). Le

(1) Hirn, *Recherches sur l'équivalent mécanique de la chaleur*, suivies du *Rapport de Clausius*, Colmar, 1858, p. 138.

(2) *Génie civil* du 24 novembre 1906.

*mile* anglais (1.609<sup>m</sup>,345), le *mille marin* (1.855 mètres), sont usités en Angleterre et en Amérique.

L'unité de masse est le *gramme* (§ 20); comme multiples, on emploie le *kilogramme* (1.000 grammes), la *tonne* (1.000 kilogrammes), etc. (Les unités anglaises sont presque toujours converties en kilogrammes; nous ne les donnerons pas).

Le système *centimètre-gramme-seconde* est appelé système C. G. S.; il est rationnel; il date du Congrès international des électriciens de 1881, et s'est répandu assez rapidement partout.

Dans ce système C. G. S., l'unité de force est la force qui imprime à la masse du gramme une accélération de 1 centimètre. On l'appelle *dyne*. Comme l'accélération de la pesanteur, à Paris, est de 9<sup>m</sup>,81 = 981 centimètres environ, la dyne est donc 981 fois plus petite que le poids de 1 gramme; c'est  $\frac{1}{981}$  gramme; autrement dit: 1 gramme équivaut à 981 dynes.

L'unité de travail ou *erg*, c'est le travail d'une dyne sur un parcours de 1 centimètre,

Si nous prenons le kilogramme = 981.000 dynes, et le mètre = 100 centimètres, on trouvera que le *kilogrammètre*, unité pratique, équivaut à :

$$981.000 \times 100 = 981 \times 10^5 \text{ ergs.}$$

On fait encore usage d'une unité qui vaut 10<sup>7</sup> ergs: le *joule*; le joule correspond par conséquent à :

$$\frac{10^7}{981 \times 10^5} = \frac{1}{9,81} = 0^{\text{kgm}},1019, \text{ environ } 0^{\text{kgm}},102.$$

La puissance d'un moteur, c'est le nombre d'unités de travail par seconde. En pratique, on donne le nom de *watt* à l'unité de puissance qui vaut 1 joule par seconde, ou 0<sup>kgm</sup>,102 par seconde. Les unités industrielles telles que le *poncelet* = 100 kilogrammètres, le *cheval-vapeur* = 75 kilogrammètres, équivalent à :

$$\frac{100}{0,102} = 981 \text{ watts} \quad \text{et} \quad \frac{75}{0,102} = 735,75 \text{ watts.}$$

Par équivalence entre les énergies mécanique et thermique, l'expérience a montré que  $426^{\text{kgm}},4$  exactement se transformeraient en une *grande calorie* (C); c'est la quantité de chaleur pouvant élever de  $0^{\circ}$  à  $1^{\circ}$  un kilogramme d'eau. Cette grande calorie équivaut donc à :

$$426,4 \times 981 \times 10^5 = 418,3 \times 10^8 \text{ ergs}$$

ou bien à 4.183 joules. Mais si on considère la quantité de chaleur élevant de  $0^{\circ}$  à  $1^{\circ}$  un gramme d'eau, l'unité sera 1.000 fois plus faible; ce sera la *petite calorie* (c), équivalant à  $418,3 \times 10^5$  ergs ou 4,183 joules.

Toutes les autres unités dont il pourra être question dans cet ouvrage dérivent facilement des précédentes en se basant sur les relations quantitatives.

**66. Formules de dimensions.** — La longueur  $l$ , multipliée par elle-même, donne une *surface*; on dit qu'une longueur possède une seule *dimension*  $l$ , tandis que la surface  $l^2$  possède *deux dimensions*, le volume  $l^3$  trois dimensions.

La *vitesse* étant le quotient d'une longueur par un temps, a pour dimension  $\frac{l}{t}$  ou  $lt^{-1}$ .

L'*accélération*  $\gamma$ , quotient d'une vitesse par un temps, aura donc pour dimension :

$$\frac{lt^{-1}}{t} = lt^{-2}.$$

La force  $f = m\gamma$  aura pour dimension  $mlt^{-2}$ , et ainsi de suite :

$$\text{travail} = fl = ml^2t^{-2}, \text{ etc.}$$

L'importance des *formules de dimension*, que nous ne faisons que signaler ici, est capitale: si les résultats d'une série d'expériences s'expriment par une équation, les termes de cette équation devront avoir même formule de dimension; sinon elle contiendra quelque erreur. Ainsi le travail a pour expression :

$$\mathcal{E} = f \times l = \frac{1}{2} mv^2;$$

dans  $\frac{1}{2}mv^2$ , la vitesse  $v$  est celle que le mobile a acquise ;  
mais on ne doit pas la multiplier par le temps et écrire  $\frac{1}{2}mv^2t$  ;  
en effet, les formules de dimension sont pour  $fl$ ,  $ml^2t^{-2}$  et  
pour  $\frac{1}{2}mv^2$ ,  $ml^2t^{-2}$ . Donc, si on introduisait le temps, les  
formules ne seraient plus *homogènes*.

---



## LIVRE II

# LA MACHINE HUMAINE

---

### CHAPITRE I

#### ARCHITECTURE DU CORPS HUMAIN

67. **Les matériaux.** — Pour suivre un ordre méthodique, nous devons indiquer la structure de la matière qui constitue les organes de toute machine vivante, l'homme et l'animal ne différant pas l'un de l'autre quant aux propriétés de cette matière. Mais il importe de dire, avant tout, que la substance animée ou *protoplasma* ne possède aucune propriété constante et parfaitement définie ; si sa composition chimique élémentaire, carbone, hydrogène, oxygène, azote, varie peu, ses caractères physiques *évoluent lentement* et dans un *sens déterminé* ; en général elle *durcit* en vieillissant, elle *fixe* et elle produit des éléments solides, des minéraux dont elle forme une matière nouvelle, un *tissu* nouveau.

Il suffit, pour nous, de considérer les tissus déjà différenciés, et de nous en tenir à ceux qui forment la trame des organes du mouvement ou organes de la *locomotion*, c'est-à-dire les *os*, les *muscles* et leurs *tendons*.

La variation continue dont le protoplasma est le siège lui fait traverser une succession d'états différents ; cette même évolution caractérise les substances dites *colloïdales* ou les *colloïdes*, la *silice gélatineuse* par exemple ; de fait, cette silice abandonnée à elle-même, perd, rejette son eau progressivement et se coagule de plus en plus jusqu'à l'état solide ; c'est une question de temps ou, si l'on peut dire, *d'âge*.

La matière vivante est essentiellement *irritable* ou *excitable* ; dans la cellule du végétal comme dans celle de l'animal, elle répond à l'*excitant*, que ce soit à la *chaleur*, à l'*électricité*, à la *lumière*, à un *choc mécanique* ou à une *action*

*chimique* ; elle répond en fuyant devant l'excitant ; son *irritabilité* est une réaction de nature obscure, mais liée aux phénomènes de nutrition <sup>(1)</sup>.

Chez l'animal, cette irritabilité se coordonne et se précise ; toutes les réactions ont une résultante appropriée à ce *but de défense*, étant convenu que ce mot but n'implique pas de finalité métaphysique, mais un déterminisme complexe qui s'éclaircit tous les jours.

La *sensibilité* est la propriété supérieure que nous décrivons, et elle est assurée par un système coordinateur spécial : le *système nerveux*.

Il semble, en conséquence, que le tissu nerveux centralise les effets de toutes les excitations et les perpétue au travers de la vie ; les *influences héréditaires*, les *traces* accumulées par l'existence y auraient un lieu d'élection. Physiquement, le système nerveux maintient la substance animale dans un état particulier qui la rend propre à réagir, et comme au seuil de la réaction ; c'est le *tonus*. Toutes les molécules protoplasmiques s'attirent avec un peu plus de force et offrent une résistance plus grande à la séparation. Il est clair que le tonus affectera la matière semi-fluide des muscles, et non point la substance rigide des os. La *cellule nerveuse* garde aussi l'effet d'une image reçue ou d'un acte exécuté, elle rend possible l'*éducation* et l'*automatisme*.

Cette activité intérieure du protoplasma, cet état dynamique continu exige *quatre conditions externes*, quatre facteurs pour l'entretenir : 1° l'*eau*, et 2° les *aliments* qui serviront, l'une à l'accomplissement des réactions chimiques, les autres à réparer l'usure organique (voir §104) ; 3° l'*oxygène*, gaz nécessaire aux combustions cellulaires, au *travail physiologique* (§ 62), et, en plus, réparateur de la matière fatiguée (§ 154) : le *sang* le véhicule à travers tout l'organisme, toutes les mailles du corps ; 4° la *chaleur*, enfin, entre certaines limites de température ; les êtres inférieurs de l'animalité vivent à des températures très variables ; les animaux supérieurs — dits à température constante ou *homéothermes* — non : l'oscillation, si elle est très ample, peut

(1) Hering, *Lotos*, t. IX, p. 35 ; 1889.

leur être mortelle ; et il paraît, en outre, que leur activité maximum se manifeste à une température constante : 37°,50 pour l'homme. Les réactions de la vie humaine se caractérisent par cet *optimum thermique*. Les variations d'intensité des quatre facteurs précédents modifient l'état physique de la matière vivante ; de *constantes physiques* de celle-ci, au sens rigoureux du mot, il n'y en a donc pas. L'âge, le *passé* avec leurs influences diverses, le *sexe* lui-même impriment des caractères différents aux organismes étudiés ; ils compliquent le problème de la *résistance des matériaux vivants* dont nous allons parler brièvement.

**68. Les os : le squelette.** — Les organes de la *locomotion* sont les os et les muscles ; les premiers sont les leviers, les

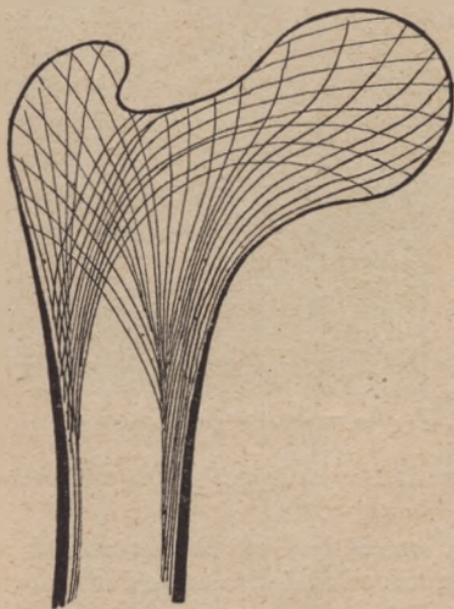


FIG. 94. — Coupe de fémur (schéma) montrant les courbes de pression (d'après Culmann).

seconds sont les puissances. La substance osseuse dérive d'une substance antérieure, plastique, gélatineuse, laquelle persiste dans les *cartilages*, les *ligaments*, les *tendons* (§ 73). Dans le jeune âge, les os se trouvent à la phase cartilagineuse ; ils fixent peu à peu des sels minéraux (carbonates et phosphates calcaires) et se consolident. La composition des os est variable : de 16 à 68 0/0 d'eau, et de 84 à 32 0/0 de matière solide, suivant l'os

considéré ; dans cette partie solide, il y a environ 35 0/0 de substance organique gélatineuse : l'*osséine*, et 65 0/0 de sels calcaires ; ceux-ci augmentent avec l'âge, tandis que

la teneur en eau diminue ; par suite la densité des os passe de 1,87 à 2 au cours des trente premières années.

C'est à l'alimentation, par le véhicule du sang, que le *squelette* emprunte ses éléments formateurs.

La forme des os est variable ; ceux des membres locomoteurs sont des tubes creux et longs, prismatiques ou à peu près cylindriques, renflés aux extrémités par lesquelles elles se mettent en rapport ou s'articulent ; ces têtes articulaires (*épiphyes*) sont de substance spongieuse, lamellaire, les lamelles y affectant une disposition favorable à la résistance aux pressions (*fig. 94 et 95*) : elle rappelle, comme le fit remarquer Culmann <sup>(1)</sup>, la courbe des pressions dans les *voutes* ; la partie médiane (*diaphyse*) est à tissu compact, presque homogène, et très résistant.

A côté des os longs, il en est de *plats*, tel l'os frontal, et qui comprennent de la matière lamellaire entre deux lames compactes à peu près parallèles.

Enfin il existe un grand nombre d'os, de formes irrégulières, mais qui dérivent sensiblement du *cube* ; tels sont les os de la *colonne vertébrale*, du pied, de la main.

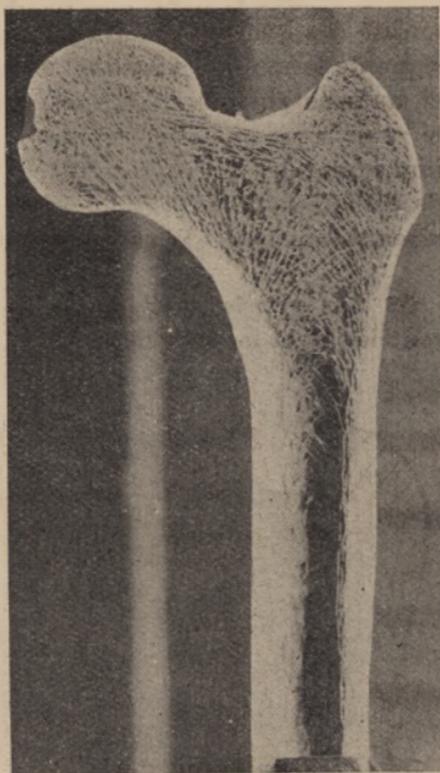


FIG. 95. — Coupe de fémur (os de la cuisse).

(1) Culmann, *Anwend. d. Graph. Statik*, t. I, p. 128 (1888-1900), Zurich.

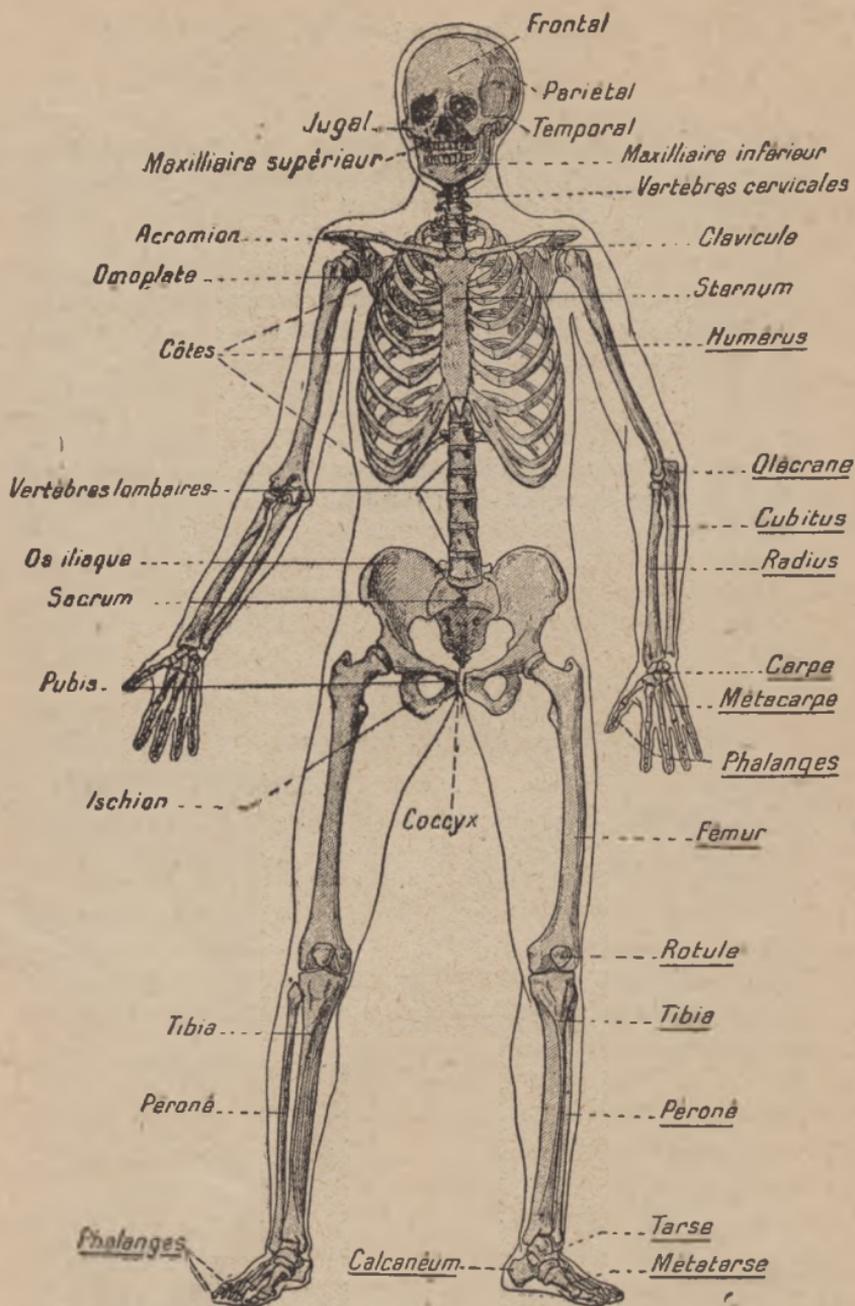


FIG. 96. — Architecture générale du squelette.

## Tableau du squelette humain.

## I. — TÊTE

*Crâne.* — Un os frontal, deux pariétaux, deux temporaux; un occipital, en arrière (non visible sur la figure) et deux os (sphénoïde et ethmoïde) formant la base, la voûte du crâne.

*Face.* — Deux os jugaux, deux maxillaires supérieurs, un maxillaire inférieur; deux nasaux, deux lacrymaux; le vomer, l'os hyoïde (celui-ci soutient le larynx) ne sont pas visibles sur la figure.

## II. — TRONC

*Colonne vertébrale.* — Trente-trois vertèbres, sept cervicales (cou), douze dorsales, cinq lombaires, cinq sacrées (soudées) et trois à quatre coccygiennes.

*Sternum:* Os plat (*poignée* en haut, *appendice xyphoïde* en bas).

*Côtes.* — Douze paires, dont sept *vraies*, articulées directement au sternum; cinq *fausses*, unies par un même cartilage.

## III. — MEMBRES

## A. — Membres supérieurs.

*Epaule.* — Omoplate, clavicule, l'acromion est soudé à l'omoplate et s'articule à la clavicule.

*Bras.* — Humérus dont le bout inférieur a deux articulations et une échancrure, celle de l'*olécrane*.

*Avant-bras.* — Cubitus avec l'apophyse de l'*olécrane*; radius qui porte la main.

*Main.* — Huit os du carpe (poignet), cinq du métacarpe (paume), trois phalanges à chaque doigt, mais deux au pouce.

## B. — Membres inférieurs.

*Hanche.* — Os iliaque comprenant trois parties (ilium, ischion, pubis) soudées.

*Cuisse.* — Fémur et un os libre : rotule.

*Jambe.* — Tibia, Péroné.

*Pied.* — Sept os du tarse dont le calcanéum (talon) et l'astragale articulé au tibia; cinq os du métatarse; trois phalanges par doigt ou orteil, sauf au gros orteil qui en a deux.

Le tableau ci-dessus et la figure 96 donnent un aperçu gé-

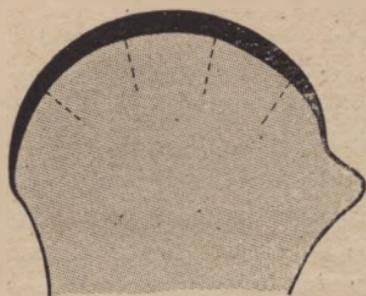


FIG. 97. — Section frontale au milieu de la tête de l'humérus.



FIG. 98. — Section perpendiculaire à la précédente.

ral des pièces squelettiques et leur nomenclature; les figures 97 à 102 représentent quel-



FIG. 99. — Section sagittale du cubitus avec la saillie S de l'olecrane.

ques sections de têtes articulaires d'après Werner<sup>(1)</sup>, ces sections étant *sagittales* (antéro-postérieures) ou *frontales* (perpendiculaires aux précédentes).



FIG. 100. — Section sagittale au milieu de la tête du radius.

Les positions réciproques des principaux os et les rapports entre les surfaces articulaires seront examinés plus loin (§ 74). Mais il y a des points de moindre résistance; c'est le cas de la partie rétrécie qui suit la tête



FIG. 101. — Section au milieu de la tête du fémur

(1) Werner, *Die Dicke der menschlichen Gelenkknorpel* (Inaug. Diss., Berlin, 1897).

fémorale, et appelée *col du fémur* ; ou encore de la partie inférieure du radius, l'une et l'autre exposées aux *fractures*.

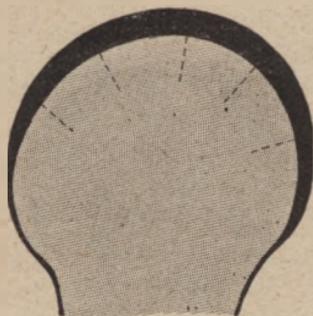


FIG. 102. — Section frontale de la tête du fémur à 5 millimètres en avant du col.

On doit, de plus, souligner l'analogie des membres supérieurs et inférieurs. Notons seulement que l'humérus forme, avec la clavicule et l'omoplate, la *ceinture scapulaire* ; le fémur, os le plus long du corps, forme, avec l'os iliaque, la *ceinture pelvienne*, plus robuste et moins

mobile que l'autre, intimement liée à la colonne vertébrale et offrant une grande fixité :

60. *Résistance du squelette*. — C'est la partie compacte des os (de la diaphyse) qui a été étudiée sous le point de vue de la résistance, d'abord par Wertheim, le premier en date (1). Il se servit d'os humains aussi frais que possible ; il opéra par traction sur des prismes suffisamment homogènes ; et il obtint, pour le module de Young et l'effort de rupture R les résultats suivants :

| OS        | SUJET    | AGE    | DENSITÉ | MODULE DE YOUNG                      | R PAR mm <sup>2</sup> |
|-----------|----------|--------|---------|--------------------------------------|-----------------------|
| Fémur ..  | Homme .. | 30 ans | 1,984   | E = 1.819<br>2.638<br>2.181<br>2.421 | 10 <sup>k</sup> ,500  |
|           | — ..     | 74     | 1,987   |                                      | 7,300                 |
|           | Femme .. | 21     | 1,968   |                                      | 6,870                 |
|           | — ..     | 60     | 1,849   |                                      | 6,400                 |
| Péroné .. | Homme .. | 30     | 1,997   | 2.059                                | 15,030                |
|           | — ..     | 74     | 1,947   | ?                                    | 4,335                 |
|           | Femme .. | 21     | 1,940   | 2.710                                | 10,260                |
|           | — ..     | 60     | 1,799   | ?                                    | 3,300                 |

Le module de Young a une valeur moyenne de 2.300 kilogrammes par millimètre carré ; c'est le double de ce qui a été trouvé pour le bois de sapin, dont la densité est 3 fois plus faible que celle de l'os (§ 46).

(1) Wertheim, *Annales de Chimie et de Physique*, 1847, t. XXI, p. 385.

La résistance à la rupture par traction est de 12 kilogrammes chez l'adulte, 6 kilogrammes chez le vieillard, en moyenne. Le bois de sapin conduit à des chiffres un peu inférieurs (8 kilogrammes).

Les déterminations de Wertheim accusent une diminution dans le sexe féminin, et avec l'âge : ce que Rauber a également reconnu (1).

La résistance à la rupture par *écrasement*, ou par compression, est de  $\frac{1}{6}$  plus élevée que dans le cas d'une traction ; on a  $R = 14$  kilogrammes en moyenne. Les valeurs changent suivant la section et la hauteur de la pièce.

La formule de Hodgkinson, établie pour les bois (§ 46), s'applique ici, en écrivant :

$$R = 2.700 \times \frac{s^2}{h^2},$$

mais il convient que  $h$  ne dépasse pas  $\frac{1}{2}$  décimètre et que les prismes ne se rapprochent pas du cube. Les formes cubiques se montrent très résistantes ; on obtient à la compression :

|                                    |                               |
|------------------------------------|-------------------------------|
| Pour un cube de 3 millimètres..... | $R = 16$ kg. au $\text{mm}^2$ |
| — 5 — .....                        | $R = 15$ —                    |

Sur des prismes, on obtient seulement de 10 à 12 kilogrammes (2).

La *vitesse* de l'effort d'écrasement a une grande importance (§ 46), car la pression, dans le choc, atteint une grande valeur.

On se rappelle que l'impulsion est :

$$Ft = mv ;$$

(1) A. Rauber, *Elasticität und festigkeit der Knochen*, Leipzig, 1876.

(2) H. Triepel, *Die Stossfestigkeit des Knochen* (*Arch. f. anat.*, 1900, p. 229) et *Einführung in die physikalische Anat.*, Wiesbaden, 1902.

d'où :

$$F = mv.$$

Pour une durée très faible, celle du choc (ou du *coup de poing*),  $F$  prend une très grande valeur, quelques centaines de kilogrammes (cas des accidents de machines ou d'automobiles).

70. Dans la *flexion* et la *torsion*, la résistance des os longs est accrue parce qu'ils sont creux (§ 47). Lesshaft <sup>(1)</sup> et Otto Messerer <sup>(2)</sup> ont déterminé la résistance des os avec leurs dimensions normales. Voici quelques valeurs obtenues par eux.

La charge d'écrasement, dès la première cassure, a été :

|                     | HUMÉRUS | RADIUS | COBITUS | FÉMUR | TIBIA | PÉRONÉ |
|---------------------|---------|--------|---------|-------|-------|--------|
|                     | kg.     | kg.    | kg.     | kg.   | kg.   | kg.    |
| Homme de 31 ans.... | 850     | 535    | 550     | 1.300 | 600   | 300    |
| Femme de 24 ans.... | 600     | 390    | 310     | 1.100 | 650   | 310    |

Pour écraser complètement le fémur, il faut 2.900 kilogrammes; il en faut au moins 4.100 pour le tibia. C'est le radius qui résiste le moins.

A la *flexion*, la résistance dépend du mode d'encastrement de l'os; au *cisaillement*, elle dépend de la zone encastree. On a :

|              | FLEXION |         | CISAILLEMENT |         |                 |
|--------------|---------|---------|--------------|---------|-----------------|
|              | MAXIMUM | MINIMUM | MAXIMUM      | MINIMUM | ZONE DE RUPTURE |
|              | kg.     | kg.     | kg.          | kg.     |                 |
| Humérus..... | 300     | 120     | 505          | 250     | aux extrémités. |
| Radius.....  | 140     | 55      | 334          | 105     | au milieu.      |
| Cubitus..... | 140     | 70      | 235          | 90      | partout.        |
| Fémur.....   | 475     | 230     | 810          | 400     | au col.         |
| Tibia.....   | 500     | 135     | 1.060        | 450     | bout inférieur. |
| Péroné.....  | 55      | 21      | 61           | 20      | au milieu.      |

(1) P. Lesshaft : nous le citons d'après Triepel.

(2) O. Messerer, *Ueber Elasticität und Festigkeit der menschlichen Knochen*, Stuttgart, 1880 (texte et atlas).

Un effort de *torsion*, agissant à l'extrémité d'un levier de 16 centimètres, a produit une fracture en spirale pour les valeurs suivantes :

| Humérus | Radius | Cubitus | Fémur  | Tibia  | Péroné |
|---------|--------|---------|--------|--------|--------|
| 40 kg.  | 12 kg. | 8 kg.   | 89 kg. | 48 kg. | 6 kg.  |

Le module de torsion ou de rigidité de l'os compact n'a pas été déterminé ; théoriquement, Werthoim admettait  $G = \frac{1}{3} E$  en moyenne (§ 48). Comme  $E = 2.300$ , on aurait  $G = 862$  environ ; on a trouvé une valeur deux fois moindre sur le sapin.

Voici, enfin, d'autres charges de rupture utiles à connaître :

|  |                  | kg.        |
|--|------------------|------------|
| Vertèbre lombaire comprimée normalement.                 | Homme de 30 ans. | 1.000      |
|  | Femme de 80 ans. | 240        |
| Thorax comprimé transversalement (rupture des côtes).    | Homme de 30 ans. | 200        |
|  | Femme de 82 ans. | 40         |
| Thorax comprimé sagittalement.                           | Homme de 40 ans. | 60         |
|  | Femme de 82 ans. | 40         |
| Bassin comprimé d'une crête iliaque à l'autre.           |                  | 180        |
| Comprimé sagittalement, le <i>sacrum</i> se brise entre. |                  | 170 et 250 |

En résumé, les os résistent d'une façon croissante jusqu'aux limites de la vieillesse, et plus chez l'homme que chez la femme, car le tissu osseux de l'homme est plus dense, son squelette plus massif. Le genre de vie, le mode d'alimentation modifient cette résistance ; c'est ainsi que le squelette des chevaux de course est plus dense que celui des chevaux vivant paisiblement dans les pâturages<sup>(1)</sup>. Par contre certaines affections siègent dans le tissu osseux et en diminuent considérablement la résistance. Ainsi la proportion de phosphate s'abaisse à 25 0/0 dans l'*ostéomalacie* et le *rachitisme*<sup>(2)</sup>. Davenport a même étudié les cas de fragilité spéciale du squelette ou l'*osteopsathyrose* ; elle serait héréditaire.

L'*ossification* du squelette demande donc à être surveillée à l'âge où elle s'effectue qui est l'*enfance*.

(1) On pourrait consulter sur l'architecture du squelette l'ouvrage de H. von Meyer : *Die Statik und Mechanik des Menschlichen Knochen-gerüstes*, Leipzig, 1873. Toutefois certaines analogies, admises par cet auteur, sont tout à fait contestables.

(2) Gallinard et König (*Comptes rendus*, 1905, t. CXL, p. 1332). — Davenport et Conard (*Eugenics Record Office, Bull.* n° 14 ; 1915).

La formation d'os de réparation ou *cal* est l'œuvre de la membrane appelée *Périoste*. Tout le temps que ce périoste est sain, nourri par ses vaisseaux, il pourra souder les fragments de l'os fracturé.

71. II. **Les muscles et leur résistance.** — Les *muscles* sont des masses charnues, plus ou moins épaisses qui s'appliquent aux os, leur assurent partiellement des positions relatives invariables et donnent son relief au corps. Nous savons, d'autre part, que ce sont les *moteurs* proprement dits, les agents du mouvement; mais nous réserverons ce dernier point.

Les muscles sont constitués par des *fibrilles* parallèles extrêmement minces; sur une section de 1 centimètre carré on en compterait près de 400 millions. Ils sont enveloppés par une membrane transparente et terminés par des lames élastiques appelés *tendons*, par lesquels ils prennent contact avec le squelette.

Les fibrilles, dans les muscles de la locomotion ou à *mouvement volontaire*, ont une structure spéciale: au lieu d'être de simples cellules allongées, elles sont *striées* transversalement, présentant l'aspect d'une pile de disques, les uns clairs, les autres sombres; ces fibres *striées* sont anisotropes et leur contenu

paraît répondre à la structure des *collodes* (§ 32), avec des éléments plus consistants que le liquide gélatineux qui remplit les fibres, éléments appelés *micelles*. L'aspect extérieur d'une fibre striée pour-

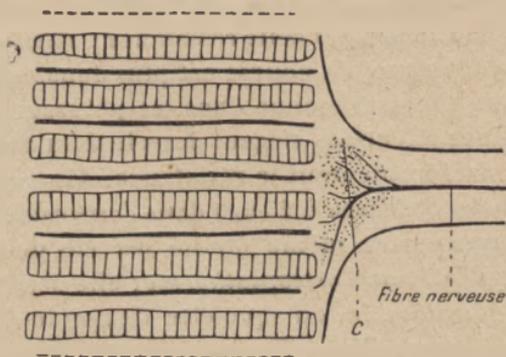


FIG 103. — Schéma d'une fibre musculaire striée avec ses connexions nerveuses.

rait être comparé à celui d'un ressort à boudin enfermé dans un cylindre de verre: les spires se projetteront en stries parallèles (fig. 103). La striation est un état dynamique acquis par le proto-

plasma (1) et très favorable à sa nutrition parce qu'il accroît les surfaces d'échanges.

Des filaments *nerveux* d'une grande ténuité arrivent aux fibres musculaires et prennent contact avec elles, directement ou indirectement; l'*arborisation terminale c* se distribue aux éléments musculaires et les gouverne on ne sait exactement comment. Sur une substance plastique, semi-fluide, telle que le protoplasma musculaire (*myoplasma*), ces fibres nerveuses produisent le *tonus* (§ 67).

La composition des muscles répond à 74 0/0 d'eau, en moyenne, chez l'homme adulte; il y en a davantage chez la femme et l'enfant. Leur



FIG. 104. — Muscle à fibres parallèles.

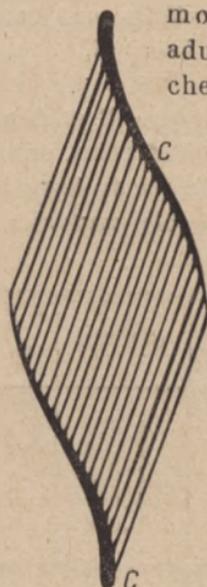


FIG. 105. — Adaptations fonctionnelles des fibres musculaires.



densité dépasse de  $\frac{1}{20}$  celle de l'eau, car le liquide ou *plasma musculaire* renferme des sels, des corps albuminoïdes, etc.; cette densité est légèrement plus faible dans le sexe féminin.

Plus il y a de fibres dans un muscle, plus, évidemment, sa résistance est grande; en un mot la résistance est proportionnelle à la masse des muscles. Mais il faut considérer que les muscles sont ou bien *courts* et *gros*, ou bien *longs*; c'est donc en se pressant les unes contre les autres et augmen-

(1) Vies, *Propriétés optiques des muscles*. Thèse, Paris, 1912.

tant la *section* des muscles que les fibres en accroissent la résistance. Il y a, sous ce rapport, des dispositions remarquables tendant à loger un grand nombre de fibres dans le *minimum de place* : les tendons ne forment plus de *gaines g* (fig. 104) pour recevoir les extrémités des fibres ; ils se transforment en *cordons grêles C* (fig. 105) donnant insertion à des fibres obliques, de manière que celles-ci se trouvent en nombre considérable dans une section normale à leur direction. Cette *adaptation*, pour réaliser le maximum de force sous le moindre volume, est purement *fonctionnelle* (§ 89).

Les muscles à fibres *paralleles* sont rares, ils sont en général pennés ou encore en éventail.

72. La résistance à la rupture R et l'élasticité des muscles ont été aussi étudiées par Wertheim, sur *cadavres frais*, par conséquent à l'abri du *tonus* et de toute influence nerveuse insoupçonnée. Sur le muscle *couturier* (de la cuisse) il obtint :

| SUJET       | AGE  | DENSITÉ | MODULE DE YOUNG | R par mm <sup>2</sup> |
|-------------|------|---------|-----------------|-----------------------|
|             | 1 an | 1,071   | E = 1,271       | 0 <sup>kg</sup> ,070  |
| Homme ..... | 30   | 1,058   | 0,352           | 0 ,026                |
|             | 74   | 1,045   | 0,261           | 0 ,017                |
| Femme.....  | 21   | 1,049   | 0,857           | 0 ,040                |
|             | 60   | 1,040   | ?               | ?                     |

De ce tableau on conclut, avec Wertheim, que le muscle de cadavre frais a pour module de Young  $E = 0,95$  et pour résistance à la rupture  $R = 40$  grammes au millimètre carré ; et ces valeurs moyennes n'empêchent pas de reconnaître que résistance et module s'abaissent chez les vieillards en même temps que la densité. Remarquons, enfin, que la résistance à la rupture est celle de la matière musculaire et de son enveloppe indistinctement, et que la déformation n'est pas, d'après Wertheim, *absolument élastique* ; elle persiste partiellement, ou encore le retour à la longueur primitive est *retardé* (§ 45). Le muscle de cadavre a donc une élasticité imparfaite.

Des déterminations faites sur le vivant ont montré que l'élasticité musculaire est moins imparfaite, sinon tout à fait parfaite; mais nous savons que, dans ces conditions, le *tonus* intervient et que la matière tend à se rétracter. La rétractilité ou la *contractilité* n'est pas l'élasticité; elle consiste dans la propriété de se raccourcir spéciale au muscle, quand agit un des *excitants*, nerveux, électrique, etc. La *contraction* est dite *volontaire* dans le cas où l'excitation est d'origine nerveuse directe. Aussi bien Mosso (1) distingue-t-il entre élasticité et *tonicité*; au moyen d'un dispositif spécial, le *myotonomètre*, agissant sur un muscle de la jambe, ce savant démontre la complexité du phénomène: il établit, avec Benedicenti que la résistance à la déformation est plus grande — que le module de Young est plus élevé — dans un muscle *contracté* que dans un muscle au repos. D'autre part, Weiss et Petren (2) s'assurent qu'il en est ainsi également quant à la résistance à la rupture; on peut dire, en un mot, que la *force de contraction* s'ajoute à la résistance, à la *cohésion* de la substance musculaire. En supprimant l'action nerveuse au moyen du *curare* (poison des nerfs moteurs), on retrouve l'élasticité des muscles de cadavre (3).

La résistance à la *torsion*, sur laquelle on a peu de renseignements, est plus faible sur le muscle contracté que relâché (4); c'est l'opposé de ce qui a lieu à la traction. Mais ce point demande vérification. En définitive, les muscles ont une résistance propre et une résistance due à leur tonicité; par leurs insertions tendineuses sur le squelette, ils consolident celui-ci dont ils maintiennent les pièces dans une fixité relative; ils donnent sa forme et son relief à l'édifice tout entier; ce sont eux, à vrai dire, qui font des diverses pièces squelettiques un échafaudage robuste.

Le tableau suivant et la figure 106 résument les principaux éléments de la musculature.

(1) A. Mosso et Benedicenti, *Arch. ital. Biol.*, t. XXV, p. 379 et 385; 1896; — t. XXVIII, p. 127.

(2) Weiss et Carvallo, *Comptes rendus Biol.*, 1899, p. 122; Petren, *Skand. Arch. f. physiol.*, 1902, t. XII, p. 328.

(3) Spiridon A. Dontas, V<sup>e</sup> Congrès de Physiol., à Turin, sept. 1901. Borelli (*De Motu Animalium*, 1680) avait déjà fait cette observation.

(4) Schenk (*Pflüger's Arch.*, t. LXXIX, p. 342; t. LXXXI, p. 584; 1900); Kaiser (*Centralblatt f. Physiol.*, t. XIV, p. 1 et 363; 1900).

## Tableau des principaux muscles.

## I. — TÊTE

Frontal. — Sourcilier. — Orbiculaire des paupières. — Orbiculaire des lèvres. — Buccinateur (fente de la bouche). — Temporal. — Masséter. — Digastrique. — Pterygoïdiens. — Splenius. — Sterno-cleido-mastoïdien. — Scalène.

## II. — TRONC

Muscles inspireurs et expirateurs (sur les côtes). — Trapèze. — Grand rond. — Grand dorsal. — Pectoral. — Dentelé. — Grand oblique.

## III. — MEMBRES

## A. — Membres supérieurs.

Deltoïde. — Biceps brachial. — Brachial antérieur. — Triceps brachial. — Radial. — Cubital antérieur. — Anconé. — Fléchisseurs et extenseur des doigts.

## B. — Membres inférieurs.

Grand fessier et moyen fessier. — Fascia lata. — Biceps fémoral. — Couturier. — Les Vastes externe (non visible) et interne, et le Droit antérieur forment le Quadriceps. — Les Jumeaux et le Soléaire forment le Triceps sural. — Péroniers. — Jambier antérieur. — Fléchisseurs et extenseurs des orteils.

La plupart des muscles, que nous venons d'étudier *statiquement*, ont des formes nettes, plus ou moins saillantes; les uns sont courts et épais, les autres longs; au repos complet des organes, des pièces squelettiques, ils sont *relâchés* et développent toute leur longueur; mais cela est rare, à cause des circonstances nombreuses (légère distension) qui sollicitent le *tonus*.

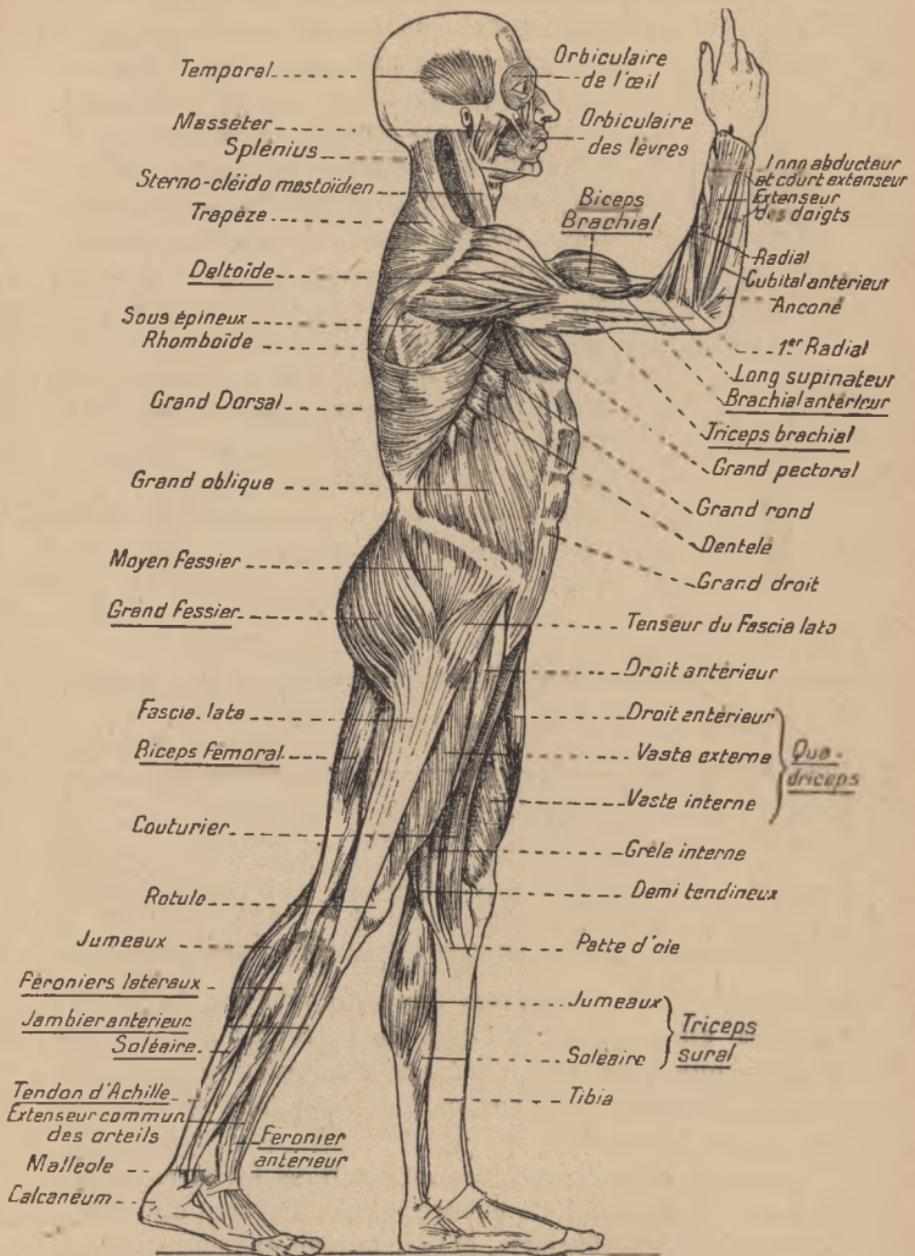


FIG. 106. — Principaux muscles du corps.

73. III. Les tendons et les cartilages. — Les tendons sont des organes à fibres élastiques qui se fixent aux extrémités des muscles et continuent l'enveloppe qui les recouvre; ils sont plus cohérents que les muscles, et, en adhérant aux surfaces rugueuses des os, ils leur servent de points d'attache solides; ils sont aussi plus denses et ne contiennent, en moyenne, que 67 0/0 d'eau. Un exemple très connu de tendons est celui du *tendon d'Achille* qui termine des muscles du mollet inférieurement et se fixe à l'os du talon ou *calcaneum* (fig. 106). La résistance des tendons a été mesurée par Wertheim, puis par Triepel. Le premier obtint, sur le tendon du *plantaire frais* (jambe) de l'homme, les valeurs suivantes :



FIG. 107.

| SUJET       | AGE    | DENSITÉ | MODULE DE YOUNG | R par mm <sup>2</sup>              |
|-------------|--------|---------|-----------------|------------------------------------|
| Homme ..... | 35 ans | 1,125   | E = 139,42      | 4 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> ,910 |
|             | 40     | 1,124   | 134,78          | 7,100                              |
|             | 74     | 1,105   | 200,50          | 5,390                              |
| Femme.....  | 21     | 1,115   | 164,71          | 10,380                             |
|             | 70     | 1,114   | 169,21          | 5,610                              |

soit un module de 146 et une force de cohésion de 7 kilogrammes en moyenne. Triepel trouve  $R = 5$  environ. De toutes façons, c'est une résistance à la traction au moins égale à la moitié de celle des os. Et les tendons ne sont que des organes de traction.

Les *cartilages* recouvrent les articulations osseuses, et dominent dans le squelette encore jeune; ils sont de nature plus cellulaire que fibreuse, et leur teneur en eau, variable avec l'âge et d'un cartilage à un autre, est très élevée: 74 0/0 environ dans le cartilage du genou, 68 0/0 dans les cartilages

des côtes. Les sels minéraux qu'ils contiennent doublent de quantité entre vingt et quarante ans.

La résistance des cartilages à la rupture est plus grande en compression qu'en traction : 1<sup>kg</sup>,500 contre 0<sup>kg</sup>, 180, d'après Triepel. Le module de Young est, en moyenne  $E = 1,50$ , très voisin de celui des muscles, mais il est rarement constant ; il peut atteindre la valeur de 16 à 20 dans certains cas.

74. IV. **Les nerfs.** — Les nerfs sont ces filaments blancs qui, rayonnant vers tous les points de l'organisme, y apportent l'*excitation motrice* ou y recueillent l'impression sensitive, la *sensation*. Ils émanent de *centres* déterminés ; ces centres sont cellulaires, mais la *cellule nerveuse* émet un prolongement très long à fonction *centrifuge*, le *cylindre-axe*, et de courts appendices, les *dendrites*, qui la mettent en rapport avec les cellules voisines. La *moelle épinière* qui parcourt le canal de la colonne vertébrale est un centre très important.

La matière nerveuse contient de 68 à 82 0/0 d'eau, et sa densité varie de 1,03 à 1,04, et très peu d'un sexe à l'autre (1) ; elle serait formée de fins granules noyés dans une matière visqueuse (2), d'un *colloïde*.

La cellule nerveuse, ronde ou ovale, a de  $\frac{2}{100}$  à  $\frac{9}{100}$  de millimètre de diamètre ; elle et ses prolongements constituent un ensemble appelé *neurone* (fig. 108) ; le plus long forme une fibre, et l'on rencontre un faisceau de fibres dans un seul nerf, ayant chacune une épaisseur de 1 à 20 millièmes de millimètres.

Les cordons nerveux prennent le nom de la région où ils se rendent ; ils se distribuent d'une manière inégale et donnent plus ou moins de fibres. A ne considérer que les fibres motrices, elles sont deux ou plusieurs par fibre musculaire striée longue ; il n'y en a qu'une dans une fibre

(1) Gomperz (*Journal of physiol.*, t. XXVII, p. 459 ; 1901-1902).

(2) Marinesco (*Biologie* du 8 janvier 1915).

courte. Cette répartition satisfait à la fonction des muscles, si diverse et si inégale. Krause a trouvé 15.000 fibres ner-

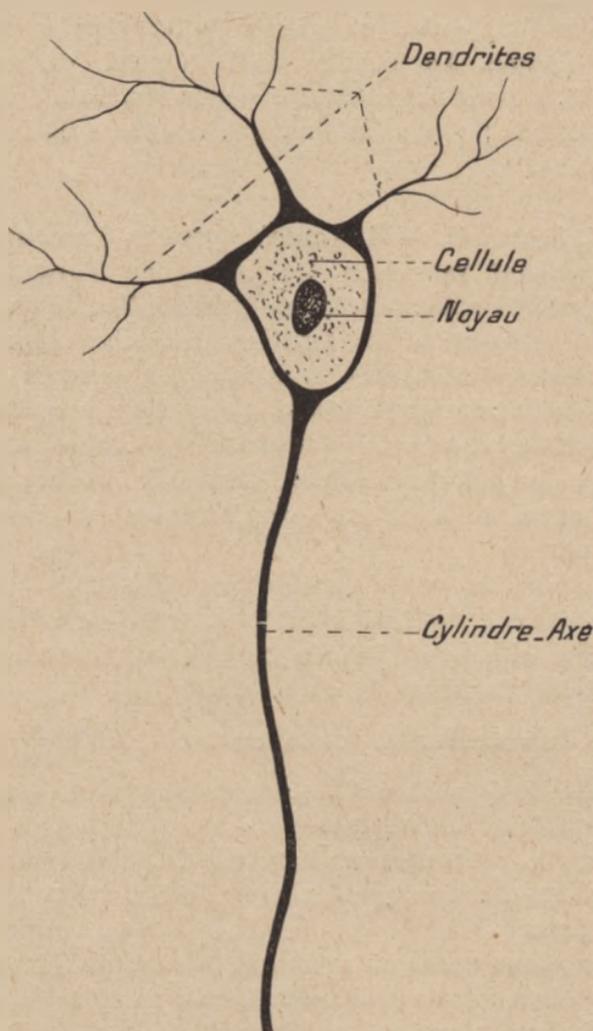


FIG. 108. — Cellule avec ses prolongements (neurone).

veuses dans le muscle *oculo-moteur* ; les six muscles de l'œil en ont ensemble près de 18.000 et ne pèsent que 3 grammes environ, c'est-à-dire que cette proportion conduirait à 180 millions de fibres nerveuses dans toute la musculature

(30 kilogrammes) ; mais, d'après Stilling, il n'y en aurait que 300.000 de réellement *motrices* et émanant de la *moelle épinière*.

La résistance des nerfs est grande ; il faut 25 kilogrammes pour rompre le *cubital*, 55 pour le *sciaticque* ; on peut adopter  $R = 2$  à 3 kilogrammes par millimètre carré. Le module est 10,9 (Wertheim). Il est intéressant de noter que les nerfs sont, de tous les organes, les meilleurs *conducteurs de l'électricité* : en prenant 100 pour la conductibilité  $K$  des muscles, on a trouvé :

|              |     |              |    |
|--------------|-----|--------------|----|
|              | K   |              | K  |
| Muscles..... | 100 | Tendons..... | 30 |
| Nerfs.....   | 588 | Os.....      | 7  |

**75. Conclusions.** — Les propriétés élastiques des tissus organisés méritent d'être rapprochées de celles d'autres substances qui, comme le *caoutchouc*, sont souvent comparées aux muscles et aux tendons.

Voici un tableau de cette comparaison :

| SUBSTANCE        | DENSITÉ | MODULE DE YOUNG         | R au mm <sup>2</sup>         | AUTEURS               |
|------------------|---------|-------------------------|------------------------------|-----------------------|
| Os .....         | 1,95    | $E = 2.300$             | 12 <sup>1</sup> <sub>5</sub> | Divers                |
| Tendons.....     | 1,12    | 146                     | 7                            | Divers                |
| Muscles .....    | 1,05    | 0,95                    | 0,400                        | Wertheim              |
| Nerfs .....      | 1,04    | 10,9                    | 2,500                        | Divers                |
| Caoutchouc...    | 0,92    | variable <sup>(1)</sup> | 0,600                        | Divers <sup>(2)</sup> |
| Fil de cocon..   | 1,33    | 650                     | 27,500                       | Frankenheim           |
| Fil d'araignée.. | 1,58    | 306                     | 18,350                       | Benton <sup>(3)</sup> |

Il ressort clairement de tous ces chiffres que la *structure* de la matière joue le principal rôle dans ses propriétés élastiques, et l'emporte sur la densité. Mais il faut remarquer

(<sup>1</sup>) Le module de Young varie avec l'allongement, depuis  $E = 0,07$  jusqu'à  $E = 15$  ; dans les limites habituelles d'allongement, on prend  $E = 0,09$  (Villari, *Pogg. Ann.*, t. CXLIII ; 1874) ; j'admets  $E = 0,25$ .

(<sup>2</sup>) Bouasse, Heim, etc. La valeur  $R$  concerne le caoutchouc *vulcanisé*, corps mal défini.

(<sup>3</sup>) Benton (*The American Journal of Science*, 1907, p. 75).

que la nature *visqueuse* des muscles et des tendons les rend propres à accumuler les déformations ; leur élasticité, qui atténue les effets des chocs, peut être *fatiguée*, par exemple dans la *marche*, la *course* ; les organes épais n'ont qu'un faible retard d'élasticité (*elastische nachwirkung*) ; on l'a constaté sur de gros câbles de caoutchouc, et c'est également le trait qui signale la musculature des athlètes.

L'élasticité se manifeste supérieurement dans les organes fondamentaux de la vie : circulatoires et respiratoires, et leur assure une protection efficace et un fonctionnement régulier (§ 51) (1) ; elle est moindre dans le squelette où elle a sa plus grande valeur dans la déformation des côtes. Et, surtout, elle est fonction de l'âge ; ses propriétés, chez l'homme, sont *optima* entre vingt et quarante ans, mais la *souplesse* des tissus est bien plus grande dans le bas âge. Elle évolue sous l'empire du travail physiologique et elle se répare ainsi dans le repos ; elle dépend du mode d'alimentation et du genre d'activité du sujet : l'adaptation et l'entraînement sont, en partie, tributaires de l'accommodation élastique des muscles. Les grands efforts comme les efforts rapides tendent à déformer les tissus d'une façon permanente, à les rompre quand, au seuil de la vieillesse, leur ténacité a faibli ; du reste, la persistance de la déformation (*contracture* de la *voûte plantaire* des pieds dans une course fatigante) (2) est corrélative d'une diminution, sinon de l'arrêt momentané de l'activité humaine, et occasionne une vive douleur.

**76. Articulations ; degrés de liberté.** — On donne le nom d'articulations aux divers modes d'union des os entre eux ; cette union se fait par rapprochement des *surfaces articulaires* ; ces surfaces sont *planes* ou *courbes* (sphériques, cylindriques, ovales) ; leur contact devant entraîner des frottements quand les os se déplacent, elles sont recouvertes de *cartilages* lisses, souples, plus ou moins épais

(1) Buttersack, *Die Elasticität, eine Grundfunktion des Lebens*, Stuttgart, 1910.

(2) Dewèvre (*Comptes rendus Biologie*, 1892 ; mémoire, p. 207).

(fig. 109); en outre, deux têtes articulaires sont parfois enveloppées d'une *capsule fibreuse* qui se prolonge intérieure-

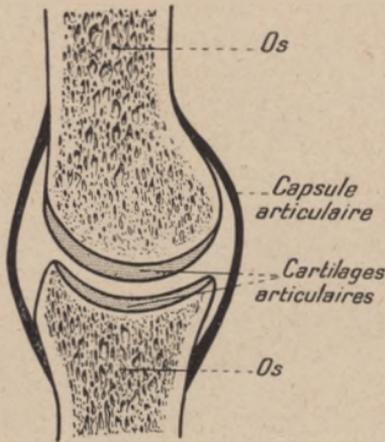


FIG. 109.

ment par une membrane humectée d'un liquide alcalin et visqueux appelé *synovie*. Cette synovie donne lieu à une *adhérence* de 550 grammes environ par centimètre carré<sup>(1)</sup>. Enfin, des *ligaments*, les tendons, les muscles entourent l'articulation et lui donnent une certaine fixité, sans toutefois gêner les mouvements qu'elle doit effectuer. Ainsi chaque mode d'articulation possède des

*liaisons* (§ 16) déterminées, plus ou moins nombreuses (fig. 110).

Lorsque les articulations sont absolument *fixes*, les os s'engrènent par de fines dentelures, réalisant des *sutures* ou *synarthroses*, à liaisons rigides (ex. : les os pariétaux). Lorsqu'elles ont une liberté extrêmement limitée, avec une liaison courte et large, on les appelle *amphiarthroses* ou *symphyses*; les *vertèbres* sont ainsi superposées par intercalation de plans cartilagineux épais et larges. Les articulations qui ont des mouvements amples et variés sont les *diarthroses*; elles caractérisent les leviers osseux, membres et doigts.

L'étude de l'homme, en tant que machine, doit s'occuper particulièrement des diarthroses et de leur degré de mobilité. Nous savons que le mouvement le plus libre revient à trois translations et trois rotations, à *six degrés de liberté* (§ 18); mais, la forme des surfaces articulaires et les liaisons sont telles qu'elles permettent de distinguer les arti-

(1) L'adhérence est une attraction moléculaire; elle a été mesurée, en ce qui concerne la synovie, par Bordier, d'après une méthode due à Gay-Lussac.

culations en cinq à six types, suivant le degré de liberté. Le plus souvent ces surfaces sont cylindriques, ovales ou spher-

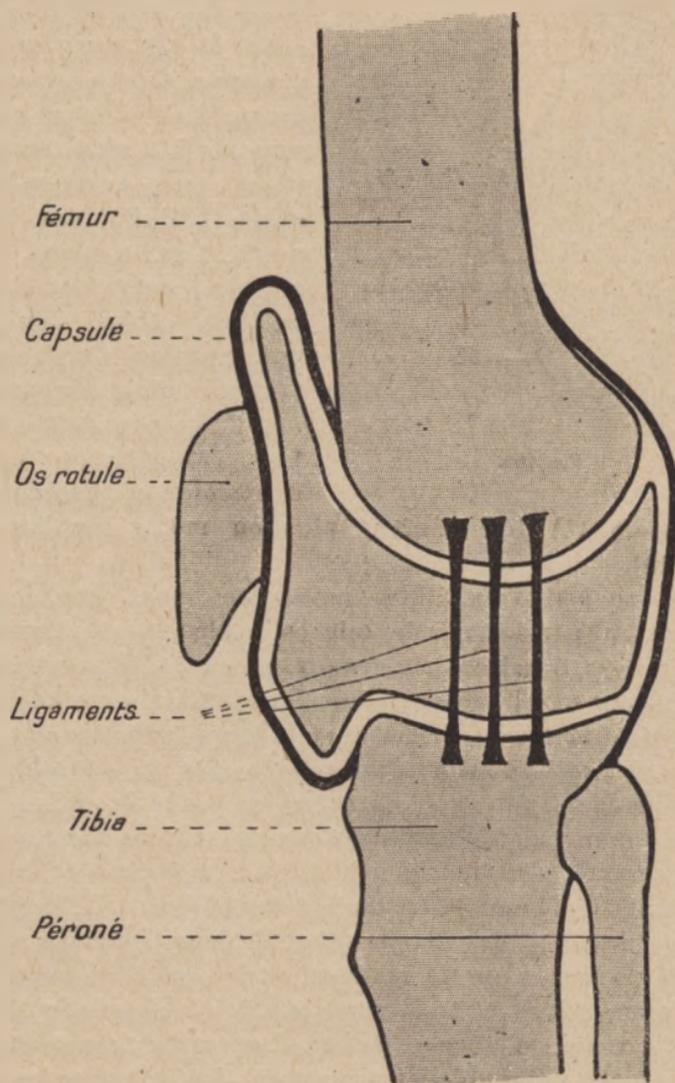


FIG. 110. — Articulation du genou.

riques, c'est-à-dire à un, deux ou à trois axes, à un, deux ou trois degrés de liberté. Les systèmes à 1 seul degré de liberté sont dits à « liaisons complètes ».

77. Détails sur les types d'articulations. — I. Les articulations à un axe ou à un seul degré de liberté sont les plus nombreuses dans l'économie. Le type en est l'*articulation cylindrique* :

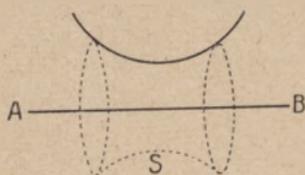


FIG. 111.

une tête cylindrique pénétrant dans un demi-cylindre creux ; mais elle est très rare sous cette forme régulière ; d'habitude la surface a un sillon S, comme si elle était engendrée par la rotation d'un arc de cercle autour de la droite AB (fig. 111) ; le mouvement qui résulte de cette disposition a lieu dans un seul plan : c'est une *flexion* ou une

*extension* ; l'os mobile tourne par un jeu de *charnière*, d'où le nom d'*articulation à charnière*. On en a des exemples dans les doigts, dans l'astragale avec le tibia (fig. 113).

C'est aussi une rotation autour d'un seul axe, mais longitudinal, dans l'*articulation à pivot* : tel est le mouvement du radius.

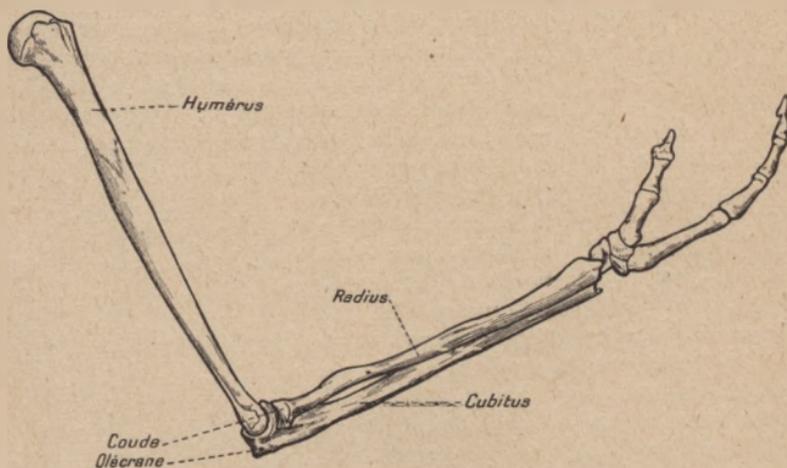


FIG. 112. — Articulation du coude.

Si l'os est *articulé à vis*, parce que le sillon S est oblique, alors le mouvement est à la fois une rotation et une translation, c'est-à-dire qu'il est *helicoidal* (28), et l'os a une translation d'un pas pour un tour ; seulement, d'une part, la rotation est de 180° tout au plus, et d'autre part la translation est limitée par les liaisons ; ce n'est donc pas deux degrés de liberté que nous avons à considérer, mais, pratiquement, un seul : la rotation. Le *coude* en offre un exemple très net, où la translation est de 1 millimètre envi-

ron <sup>(1)</sup> (fig. 112); l'articulation de l'astragale n'est pas loin d'être aussi une articulation hémicoïdale (fig. 113). Lorsque, enfin, la section de la tête articulaire est une *courbe spirale* (fig. 114), l'os mobile recule, car la distance du point M au centre O n'est pas constante; et il s'ensuit une traction sur les ligaments dont l'élasticité viendra limiter le déplacement. Il en est ainsi dans l'articulation du genou (fig. 110) ou tibio-femorale.

II. Le mouvement à deux degrés de liberté

se caractérise nettement dans l'*articulation ovale*, à deux axes très inégaux (art. ellipsoïdale) ou presque égaux (art. sphéroïdale); le grand axe est perpendiculaire à la direction du membre, c'est-à-dire transversal; si les surfaces s'appliquent étroitement, seul sera possible le mouvement autour du grand axe AB (fig. 115), limité par le contact de l'os mobile avec les bords de la cavité articulaire. Tel est

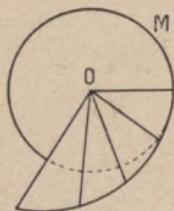


FIG. 114.

le cas de l'articulation de l'avant-bras au poignet (radio-carpienne), et ce serait un seul degré de liberté; mais généralement le mouvement est possible autour du petit axe CD également, et l'os mobile pourra tourner sur lui-même; d'où une rotation ou *torsion* avec flexion et extension. Il convient d'ajouter que l'ovale ou l'ellipse ont deux courbures différentes, c'est-à-dire deux centres de courbure, en sorte que la tête articulaire, dans son double mouvement, ne tourne pas

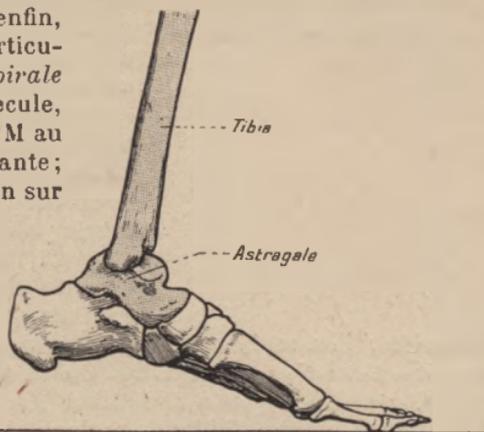


FIG. 113. — Articulation du pied

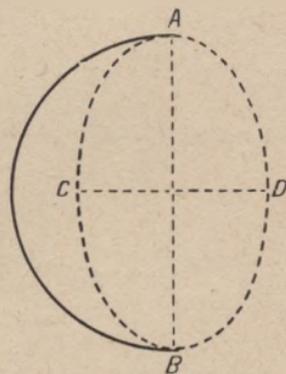


FIG. 115. — Articulation ovale

(1) W. Hultkranz, *Das Ellenbogengelenk und seine Mechanik*, léna, 1897.

autour d'un même point; ce point change de position; tous les axes intermédiaires pourraient être, comme AB et CD, des axes de rotation; mais on peut démontrer que le mouvement se produit autour de l'axe qui entraîne le *minimum* d'action de la part des cartilages (1). Cela fut reconnu par Listing sur le mouvement du sphéroïde de l'œil. La loi de Listing établit que le mouvement des yeux entraîne le travail le plus faible de la part des muscles oculomoteurs. On peut rappeler, à ce sujet, que le *moment d'inertie*

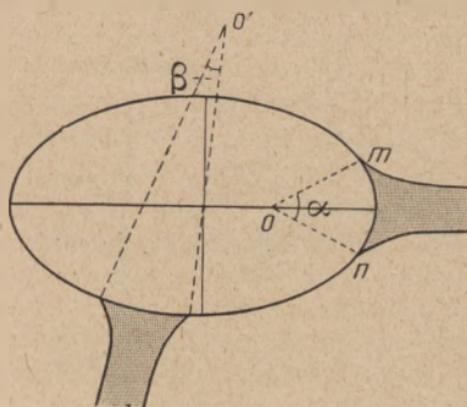


FIG. 116.

d'un ellipsoïde est minimum quand la rotation se fait autour du grand axe, et que le déplacement angulaire est moindre suivant cet axe que suivant le petit: en effet, pour un même déplacement  $mn$ , les deux rayons de la petite courbure (2) forment un angle  $\beta$  inférieur à l'angle  $\alpha$  que donnent les rayons de la grande courbure (fig. 116).

On a réservé le nom d'*articulation en selle* à une articulation où la surface de l'os fixe est analogue au dos d'une selle de cheval, la surface de l'os mobile occupant une direction perpendiculaire et l'épousant assez exactement. Il n'y en a pas d'autre exemple net que celui du trapèze  $t$  (fig. 116) articulé à l'os métacarpien du pouce; une selle recouvre l'autre, le creux rempli par le dos. Le mouvement diffère peu de celui de l'articulation ovale.

III. Les trois degrés de liberté s'observent dans l'*articulation sphérique* ou à trois axes. Centrées l'une sur l'autre, la tête articulaire et la cavité sphérique sont telles que la première se meut dans la seconde jusqu'à ce que le col de l'os mobile heurte les bords de la cavité, et la liberté du mouvement sera d'autant plus grande que la tête articulaire aura un rayon plus grand que la cavité.

Trois rotations, autour de trois axes rectangulaires, sont donc

(1) Otto Fischer, *Ueber gelenke von zwei graden der Freiheit* (Arch. f. Anat., 1897, Suppl., p. 242); *Zur Kinematik des Listing'schen Gesetzes* (Abhandlungen d. mathematisch-physischen Classe. d. königl. Sächsischen Gesell. d. Wiss., 1909, t. XXXI).

(2) On sait que la courbure est petite quand elle appartient à une circonférence de grand rayon, et réciproquement; le rayon de courbure est donc inverse de la courbure.

possibles, ainsi que cela se reconnaît dans les articulations de l'épaule et de la hanche, et leur amplitude est très accentuée.

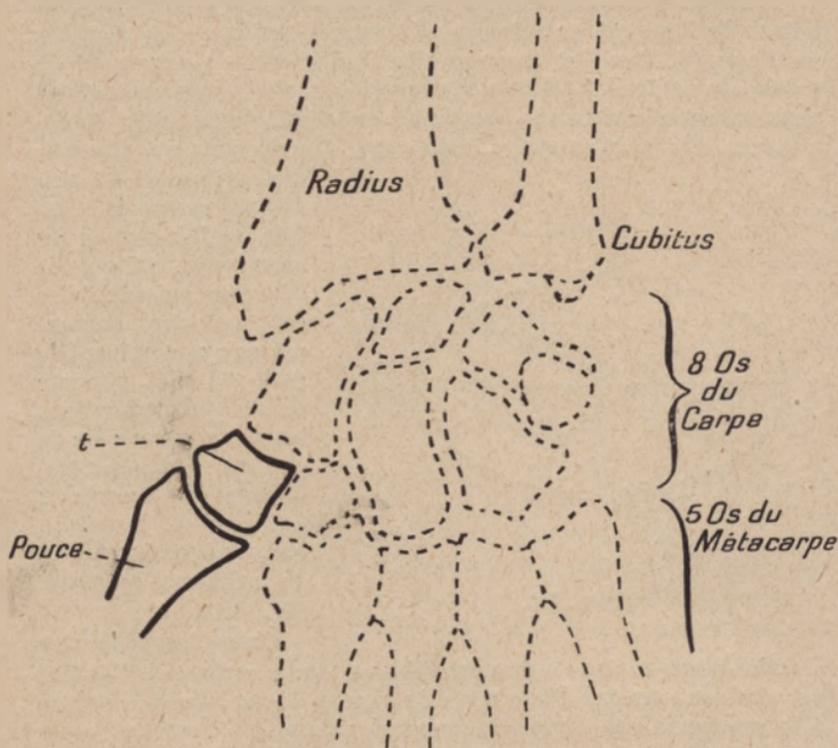


FIG. 117. — Articulation du trapeze *t* au métacarpe (articulation en selle).

Ces trois axes sont des « axes instantanés » ; mais en prenant l'os au repos, la cuisse, par exemple, on peut voir que l'axe du membre permet une torsion ou rotation autour de la verticale, qu'il y a un axe frontal autour duquel le membre fléchit, et un axe sagittal pour les mouvements latéraux. L'amplitude du mouvement latéral est de 90° environ ; elle est de 150° pour l'épaule.

IV. Lorsque deux ou plusieurs articulations se meuvent solidai-  
rement, le degré de liberté augmente ; c'est ce qui se produit dans les mouvements de la main, mobile sur le poignet qui a de nombreux os articulés (fig. 116), dans ceux de la colonne vertébrale ou la tête, par exemple, utilise les vertèbres cervicales trois fois plus que l'articulation de *atlas* avec l'occipital (1), etc. Nous ne saurions entrer, ici, dans le détail de ces « combinaisons » et « compositions » d'articulations simples ; nous retiendrons seulement que cette plus grande liberté de mouvement qui en résulte soulage

(1) J.-H.-O. Reys (*Arch. Néerl. de Physiol.*, 1921, t. VI, p. 179).

les ligaments, tendons et muscles, d'une partie importante de leur effort, et sert à l'économie de force dans la machine humaine.

**78. Le corps humain : I. Forme.** — Les diverses pièces que nous avons examinées constituent l'ensemble locomoteur; mais les fonctions qui entretiennent le mouvement sont celles de la respiration, de la circulation et de l'innervation dont le siège (sauf les centres cérébraux) est le *tronc*; tout l'appareil digestif est à la partie inférieure de ce *tronc*. La tête renferme les organes directeurs, ceux des *sens* et de la « volonté ». Et de cet ensemble si complexe se dégage une admirable harmonie. La *forme* est la moins encombrante; elle se rapproche du *prisme*; le corps humain subit l'effet de son propre poids, et l'on démontre que dans les formes prismatiques ou cylindriques la section de *moindre résistance* est à peu près *au milieu* de la hauteur; c'est là que se fait sentir le plus la charge du corps ou la pesanteur, mais aussi c'est là que le corps est *élargi* à la manière des renflements des colonnes qui s'observent sur les monuments; le *bassin*, l'*épine dorsale* subissent à ce niveau un véritable renforcement; la robustesse, selon la sagesse antique, réside dans les « reins ». Mais un développement exagéré des os iliaques gênerait la *marche* en produisant des rotations du corps (voir § 270); aussi les peuples « marcheurs », nomades, ont-ils un bassin relativement étroit, contrairement aux lourds athlètes dont les hanches sont très écartées et bien musclées (lutteurs). Les articulations féminines sont les plus mobiles.

Les actions dynamiques (professions, sports) favorisent la croissance ou l'affinement du corps : les « forts des halles » les charretiers, coltineurs, débardeurs, sont souvent massifs; les danseurs, coureurs, escrimeurs, sont sveltes, presque maigres. Le port des fardeaux, à la longue, modifie la forme des membres : la marche sous charge finit par aplatir le *pied* et l'*allonger* d'une manière permanente; il en est de même de la main dans le maniement d'outils pesants (marteau, pelle, pioche, épée, etc.); l'axe du corps, la *colonne vertébrale* peut s'incurver en sens opposé au fardeau (cas des paysans, portefaix, fantassins quelquefois), et, sous une pression continue, la colonne subit un tassement qui réduit sensiblement sa longueur.

Les proportions des membres créent les aptitudes professionnelles : les membres *longs* ont des mouvements *amples*, mais *lents* ; les membres *courts* dénotent la *vitesse* ; ainsi le bûcheron, le forgeron, le scieur de long, etc., ont d'autant plus de force ou d'effet que l'outil est à l'extrémité d'un bras plus long. La forme du corps est souvent, sous ce rapport, un guide pour le choix d'ouvriers propres à tel ou tel travail ; mais ce guide ne saurait être absolu, car l'*adaptation* est un facteur de toute importance ; tel escrimeur fit merveille en dépit de sa petite taille qui le désavantageait et épuisait ses forces. Toutefois, normalement, les hommes sont organisés et agencés pour travailler d'une certaine façon parce que c'est ainsi que leur travail est le plus économique.

Sous le rapport de l'*âge*, on peut admettre que la résistance du corps humain est maximum entre vingt-cinq et quarante ans. Notons, en effet, que le squelette n'achève sa consolidation, son *ossification* et ses soudures, qu'au voisinage de la vingtième année : seize à 18 ans pour l'*omoplate* qui, en se développant, présente aux muscles de larges surfaces d'insertion ; dix-huit ans pour l'*humérus*, vingt à vingt-cinq pour le *cubitus*, l'*os iliaque*, le *fémur* ; vingt-cinq à trente ans pour la colonne vertébrale. Les os de la main ne sont, eux-mêmes, à fin d'ossification que de douze à treize ans. On comprend ainsi la nécessité de ménager l'effort dans le jeune âge, et de ne pas déformer des organes condamnés, de ce fait, à ne plus évoluer normalement. A dire vrai, la science devrait toujours s'inscrire en faux contre la pratique industrielle qui fait travailler des enfants n'ayant pas atteint leur *quinzième année* ; cela prépare des races mal conformées, chétives, une humanité rabougrie. Où sont les législateurs qui auront à cœur de faire cesser une organisation sociale à ce point criminelle ?

Les blessures, les maladies modifient la forme et la résistance du corps humain. C'est surtout le cas de la *tuberculose*, génératrice de *thorax étroits*, de musculature maigre et sans force (1).

(1) On peut consulter, à ce point de vue, l'ouvrage de Gwilym G. Davis, *The Construction of human body, considered in relation to its fonctions, diseases and injuries*, 3<sup>e</sup> éd., 1919.

Il y a donc des précautions à observer dans le classement et l'emploi des ouvriers ou employés.

79. II. *Taille.* — La *taille* est le développement vertical du corps ; c'est sa hauteur, l'homme étant debout ; on la mesure au moyen de la *toise anthropométrique* (voir *Technique*, § 209). Souvent, on distingue la *taille debout* de la *taille assise*, le sujet étant, dans ce dernier cas, assis pour n'accuser que le développement de son buste.

En moyenne, la taille de l'adulte est de 165 centimètres ou 16<sup>dm</sup>,5 ; elle varie suivant les races et les contrées, ses limites inférieure et supérieure sont 125 centimètres et 199 centimètres. En France la taille moyenne atteint 164<sup>cm</sup>,60 ; elle était de 1<sup>cm</sup>,90 plus grande vers 1725, soit 166<sup>cm</sup>,50 à deux siècles en arrière (1).

Celle de la femme est de 10 à 11 centimètres inférieure à la taille de l'homme ; la différence était seulement de 5 à 7 centimètres à l'époque déjà indiquée (2) ; ainsi la taille a diminué depuis deux cents ans pour la femme comme pour l'homme.

Le genre de vie, les conditions de milieu modifient la valeur de la taille : les ouvriers sont, généralement, plus petits que la population environnante (3), et les travailleurs des usines et fabriques que ceux de plein air (4) ; les pauvres sont plus petits que les riches, dans un même pays, une même ville. La comparaison a été faite entre plusieurs arrondissements de Paris, et elle a été des plus nettes à cet égard (5).

Mac-Auliffe et Marie ont trouvé, après Variot (6), que les femmes de condition aisée ont près de 4 centimètres de plus que les femmes pauvres ; différence qui existe dès l'enfance vers treize et quatorze ans. Et ils estiment, d'après

(1) L'abbé de Fontenu, *Hist. Acad. Royal. Sc.*, 1725, p. 16.

(2) Voltaire, *Dictionnaire philos.* (art. *Homme*).

(3) Beddoc, *The stature and bulk of man in the Brit. Isles*, 1870, p. 148.

(4) Houze (*Bull. Soc. Anthropol. de Bruxelles*, 1887).

(5) Bertillon, *L. Manouvrier*.

(6) Marie et Mac Auliffe (*Comptes rend. Acad. Sc.*, 29 mai 1911) ; Variot (*Clinique infantile*, 1905, p. 430). Pour les enfants, voir Niceforo (*Revue*, 1907, p. 430).

une série de mesures, que la *Parisienne* est plus grande de 3 centimètres environ que la moyenne des Françaises.

Au cours de l'âge, la taille s'élève différemment dans les

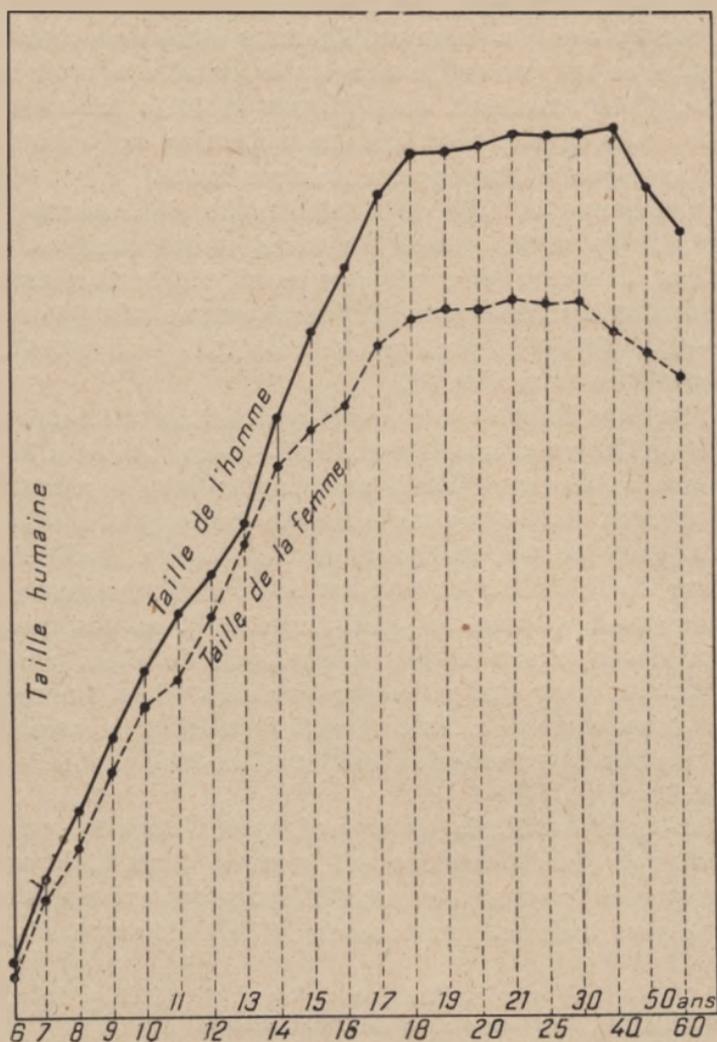


FIG. 118. — Taille de l'homme et de la femme.

deux sexes. A la naissance, les garçons mesurent  $49^{\text{cm}},90$  et les filles un peu moins :  $49^{\text{cm}},20$ , d'après la moyenne des déterminations effectuées à Paris. L'écart s'accroît avec les années. Jusqu'à douze ans, il ne dépasse pas 2 à 3 centi-

mètres. Vers la dix-huitième année, la femme a achevé sa croissance : celle de l'homme continue de progresser et ne s'arrête qu'entre vingt-cinq et trente ans.

Voici un tableau dressé par Quételet <sup>(1)</sup> relatif aux variations de la taille, entre six et soixante ans, pour chacun des deux sexes. Nous lui donnerons une représentation graphique, en portant les âges en *abscisses* et les tailles en *ordonnées* (fig. 118).

TAILLE HUMAINE

| AGE   | HOMME                 | FEMME                 | AGE    | HOMME                 | FEMME                 |
|-------|-----------------------|-----------------------|--------|-----------------------|-----------------------|
| 6 ans | 104 <sup>cm</sup> ,60 | 103 <sup>cm</sup> ,20 | 17 ans | 167 <sup>cm</sup> ,00 | 154 <sup>cm</sup> ,40 |
| 7     | 111,20                | 109,60                | 18     | 170,00                | 156,20                |
| 8     | 117,00                | 113,90                | 19     | 170,60                | 157,00                |
| 9     | 122,70                | 120,00                | 20     | 171,10                | 157,00                |
| 10    | 128,20                | 124,80                | 21     | 172,20                | 157,70                |
| 11    | 132,70                | 127,50                | 25     | 172,20                | 157,70                |
| 12    | 135,90                | 132,70                | 30     | 172,20                | 157,90                |
| 13    | 140,30                | 138,60                | 40     | 171,30                | 155,50                |
| 14    | 148,70                | 144,70                | 50     | 167,40                | 153,60                |
| 15    | 155,90                | 147,50                | 60     | 163,90                | 151,60                |
| 16    | 161,00                | 150,00                |        |                       |                       |

A partir de la cinquantaine, la taille subit une réduction : c'est la *diminution senile* ; elle atteint 2<sup>cm</sup>,50 pour l'homme, 2<sup>cm</sup>,70 pour la femme, à peu près vers l'âge de soixante ans. Les personnes de grande taille s'en ressentent davantage : elles se voûtent et s'affaissent.

En dehors de cette évolution fatale, l'on a reconnu que les pressions verticales, le port des fardeaux abaissent légèrement la taille ; la station *debout*, quand elle est continue et répétée, conduit au même résultat. Par contre la position couchée, ou assise, l'immobilité forcée au lit, exagèrent le développement vertical du corps. Il semble, enfin, que les sujets qui se tiennent bien droits, les militaires notamment, voient leur taille s'accroître un peu, et conserver cet accroissement.

(1) Quételet, *Physique sociale*, II, chap. II et III ; 1869 ; *Anthropométrie*, 1871.

**80. Buste et coefficient thoracique.** — Si l'on compare diverses personnes, ayant une *même taille*, on pourra trouver que la partie supérieure du corps, que le *buste*, en un mot, change de grandeur de l'une à l'autre. Les dimensions du buste, par l'importance des organes qu'il renferme, sont très significatives. On les évalue en déterminant :

1° Le *périmètre thoracique*, pris au niveau des têtons;

2° La hauteur du *corps assis*, qui est celle du buste, la tête y comprise ;

3° L'*envergure*, ou la longueur horizontale développée par les bras tendus (voir sur toutes ces mesures la *Technique*, (§ 211)).

Quand le buste est développé normalement, que les proportions du corps sont harmonieuses, on vérifie que l'*envergure dépasse la taille totale de 4 centimètres* environ. Le périmètre thoracique de l'homme est, en bonne moyenne, de 0<sup>m</sup>,92; celui de la femme 0<sup>m</sup>,68, ce qui fait un rapport de *cinq septièmes* environ. On peut en relever le tracé au moyen ordu *Thacographe* (§ 218).

D'autre part, le rapport de la *taille assise* à la *taille totale* est de 0,53 en moyenne, savoir : 0,5378 pour les petites tailles, 0,5285 pour les grandes. Dans le sexe féminin, ces rapports sont légèrement plus faibles. On pourrait appeler *coefficient thoracique* ce rapport :

$$\frac{\text{Buste}}{\text{Taille}} = 0,53.$$

A ce point de vue, on distingue deux types bien caractérisés : les sujets qui ont les *membres inférieurs* trop longs, comparativement au buste; et les sujets dont les membres inférieurs sont trop courts. M. Louis Manouvrier <sup>(1)</sup> les a dénommés : *macroskèles* (vulgairement « échassiers », « jambes longues ») et *brachyskèles* (ou « courtauds », « jambes courtes »). Le développement du thorax est donc indépendant de celui des membres.

Les bras et les jambes suivent, sous ce rapport, une

(1) Louis Manouvrier (*Mémoire de la Société d'anthropologie de Paris*, t. II, fascicule 3; 1902).

même évolution. Le fait s'observe facilement chez les enfants ; leurs membres s'allongent à l'excès, tandis que le buste conserve sa valeur normale.

Ainsi l'importance de la *taille assise* tient au rôle physiologique du thorax et à la constance de ses dimensions <sup>(1)</sup>. Il renferme l'axe du corps qui est la colonne vertébrale, à laquelle sont, en quelque sorte, suspendus cœur et poumons. Par cela même, il est le dispensateur de l'énergie humaine. Et c'est pourquoi il est plus développé chez l'homme que chez la femme : le premier, à raison de sa puissance musculaire, doit avoir une activité respiratoire intense, un grand tirage ; la seconde a une prédominance marquée des fonctions digestives.

Au-dessus de la valeur 0,53, le coefficient thoracique désigne des sujets robustes, au-dessous des constitutions faibles ou débiles <sup>(2)</sup>.

**81. Capacité vitale.** — Le déplacement d'air qui s'effectue dans les poumons est proportionnel à l'ampliation thoracique. Sa plus grande valeur peut être déterminée en faisant une *inspiration* très profonde, aussitôt suivie d'une *expiration* forcée, tout l'air étant rejeté dans un *compteur à gaz* ou *spiromètre*. On mesure ainsi ce que Hutchinson appelait « capacité vitale » <sup>(3)</sup>. Pour un homme adulte bien portant, la capacité vitale est de 3<sup>l</sup>,75 ; 2<sup>l</sup>,75 pour la femme <sup>(4)</sup>. En général, à partir de l'âge de trois ans, elle est seulement de 0<sup>l</sup>,400, elle subit un accroissement annuel de 0<sup>l</sup>,120. Il en est ainsi jusqu'à la trentaine. Plus simplement, on admet que la capacité vitale suit le développement de la *taille* à raison de 0<sup>l</sup>,05 ou de 0<sup>l</sup>,04 par centimètre suivant qu'il s'agit de l'homme ou de la femme <sup>(5)</sup>, et à partir de quatre ans. Dans les cas de macroskélie ou de brachyskélie, elle est fonction du périmètre thoracique.

(1) R. Collignon (*Bull. soc. anthrop.*, Paris, 1883).

(2) Jules Amar, *Organisation physiologique du travail*, p. 45 et suiv.

(3) Hutchinson (*Trans. of the med. chir. soc.*, t. XIX, 1848).

(4) Pagliani, *Lo sviluppo umano per età*, Milano, 1879.

(5) Arnold, *Ueber die Athmungs des menschen*. 1855 ; Sneyf, *Gazette médicale*, 1857.

La capacité vitale, comme d'ailleurs le coefficient thoracique, sont sensiblement plus élevés dans les *tailles moyennes*, et celles-ci paraissent souvent plus robustes, plus musclées que les grandes tailles. Il semble même qu'une évolution se produit qui tend à réduire la taille au profit d'une résistance et d'une robustesse plus accentuées (1). Les mesures de capacité vitale sont donc d'une très grande utilité (voir § 240 et 250).

82. III. Surface et volume du corps. — La relation entre le volume, le poids et la densité d'un corps est :

$$V = \frac{P}{D}$$

Connaissant D, une simple pesée du sujet donnera le volume de son corps. On adopte  $D = 1,035$  en moyenne, (d'après plusieurs mesures de Mies) (2).

Cette densité a été déterminée, en réalité, d'après le volume : la personne étant plongée dans une baignoire ayant un trop plein ; l'eau déplacée représente le volume du corps immergé (voir *Technique*, § 211). Le rapport  $\frac{P}{V}$  a donné 1,035, à la suite de 59 déterminations, les sujets ayant les poumons partiellement remplis d'air.

L'évaluation de la *surface du corps* pourrait être faite théoriquement. En effet, supposons un *cube* de volume V ; le côté de cube sera  $\sqrt[3]{V}$  ; la surface totale, étant données les six faces du solide, sera :  $6 \times (\sqrt[3]{V})^2 = 6 \sqrt[3]{V^2}$ . Il est clair qu'en tenant compte de la densité on pourra substituer le poids au volume et écrire  $S = K \sqrt[3]{P^2}$ . Mais le coefficient K change suivant la forme du corps, qui n'est pas réellement cubique. Pour l'homme, on trouve  $K = 12,312$ . La surface est donc :

$$S = 12,312 \sqrt[3]{P^2}$$

P étant exprimé en grammes et S en centimètres carrés.

(1) L. Manouvrier, *loc. cit.*, p. 200.

(2) Mies (*Virchow's Archiv.*, t. CLVII, p. 90 : 1899).

C'est la *relation de Meeh* <sup>(1)</sup>. Ainsi le corps d'un adulte de 65 kilogrammes a pour surface :

$$S = 12,312 \sqrt[3]{65,000^2} = 19.896 \text{ centimètres carrés ou } 1^{\text{m}^2},99.$$

Pratiquement, nous prendrons 2 *metres carrés* en chiffre rond.

Si nous considérons deux individus de poids différents (un adulte et un enfant), leurs surfaces seront entre elles comme la racine cubique du carré de leurs poids ; en d'autres termes, la surface diminue *moins vite* que le poids. On a :

$$\frac{S'}{S} = \frac{12,312 \sqrt[3]{P'^2}}{12,312 \sqrt[3]{P^2}} = \frac{\sqrt[3]{P'^2}}{\sqrt[3]{P^2}} = \sqrt[3]{\frac{P'^2}{P^2}}.$$

Faisons, par exemple  $P' = \frac{1}{8} P$ , nous aurons :  $\frac{S'}{S} = \frac{1}{4}$ . Ainsi les poids variant de 8 à 1, les surfaces varieront de 4 à 1 seulement deux fois moins vite. Donc, *relativement à leurs poids, les enfants ont une surface plus grande que les adultes.*

On a cherché des méthodes correctes pour évaluer la surface du corps ; elles sont généralement complexes <sup>(2)</sup>. Mais celle de Jules Lefèvre <sup>(3)</sup> nous paraît plus simple : On habille le sujet d'un vêtement souple moulant parfaitement le corps. Soit P le poids du vêtement, p le poids d'un décimètre carré de la même étoffe ; le rapport P/p donne la surface du corps. Ce procédé devient très sensible en effectuant les pesées au moyen d'une bonne balance. E. et D. Dubois <sup>(4)</sup> donnent une formule qu'ils estiment exacte à 1,5 0/0 près.

C'est :

$$S = 71,84 P^{0,425} \times T^{0,725}.$$

<sup>(1)</sup> Meeh *Zeitsch. f. Biol.*, t. XV, p. 440 ; 1879). Le coefficient K de la formule varie légèrement avec l'état, maigre ou obèse, du sujet.

<sup>(2)</sup> Citons, pour mémoire, une méthode géométrique due à Bouchard (*Compt. Rendus Acad. Sc.*, 1897, t. CXXIV, p. 844), une formule due à Miwa et Stölzner (*Zeit. Biol.*, 1898, t. XXXVI), enfin un procédé également géométrique, mais plus correct, enseigné par B. Roussy (*C. R.*, 17 juillet 1911, p. 205, et 14 avril 1913, p. 1171). Roussy tient compte même de la surface des oreilles et des parties génitales : il y a là une très grande approximation.

<sup>(3)</sup> Jules Lefèvre, *Bioénergétique*, p. 501 ; chez Masson, 1911.

<sup>(4)</sup> *The Arch. of Intern. Medic.*, 1916, t. XVII, p. 865.

Il convient de remarquer que surface, volume et densité du corps humain subissent des variations quand il y a obé-

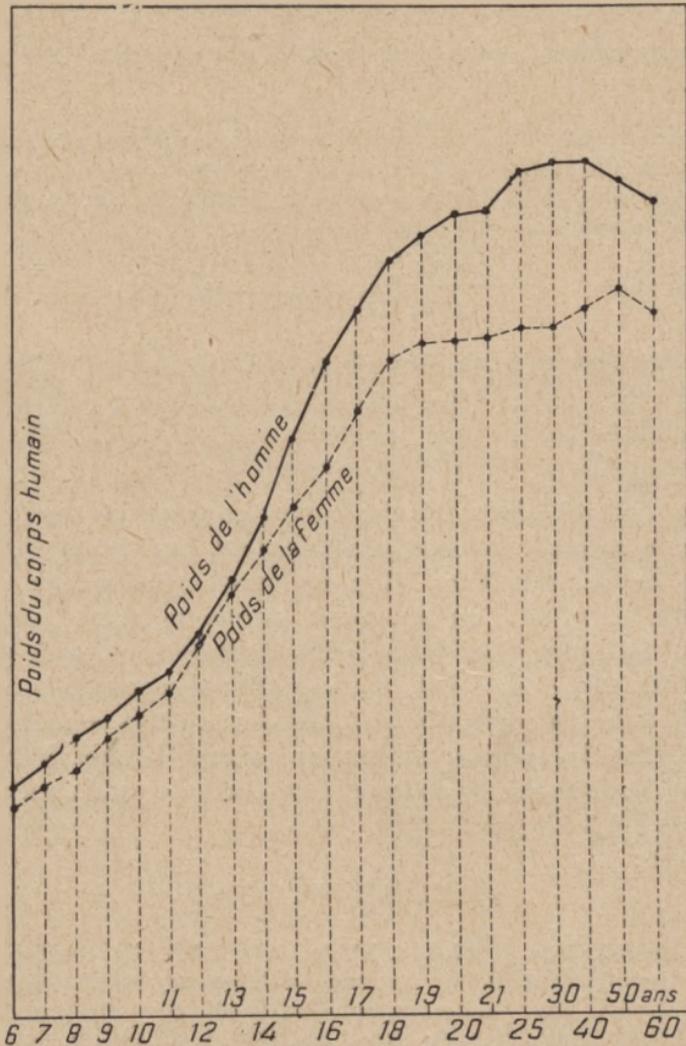


FIG. 119. — Variation du poids du corps avec l'âge.

sité ou maigreur extrême; ce sont là des causes dont il est difficile de faire la part exacte.

83. IV. Poids du corps humain. — Le poids moyen du corps humain, en fonction de l'âge et pour chacun des deux sexes, a été déterminé par différents auteurs. Nous citerons, en particulier, les mesures de Quételet, entre les limites de six et soixante ans (tableau et figure 119) :

POIDS DU CORPS HUMAIN

| AGE   | HOMME               | FEMME               | AGE    | HOMME               | FEMME               |
|-------|---------------------|---------------------|--------|---------------------|---------------------|
| 6 ans | 18 <sup>k</sup> ,04 | 16 <sup>k</sup> ,74 | 17 ans | 57 <sup>k</sup> ,40 | 49 <sup>k</sup> ,08 |
| 7     | 20,16               | 18,45               | 18     | 61,26               | 53,10               |
| 8     | 22,26               | 19,82               | 19     | 63,32               | 54,46               |
| 9     | 24,09               | 22,44               | 20     | 65,00               | 54,46               |
| 10    | 26,12               | 24,24               | 21     | 65,00               | 54,46               |
| 11    | 27,85               | 26,25               | 25     | 68,29               | 55,08               |
| 12    | 31,00               | 30,54               | 30     | 68,90               | 55,14               |
| 13    | 35,32               | 34,65               | 40     | 68,81               | 56,65               |
| 14    | 40,50               | 38,10               | 50     | 67,45               | 58,45               |
| 15    | 46,41               | 41,30               | 60     | 65,50               | 56,73               |
| 16    | 53,39               | 44,44               |        |                     |                     |

Le poids moyen de l'adulte est : 65 kilogrammes et 55 kilogrammes pour l'homme et pour la femme, soit un écart de 10 kilogrammes. Et l'on observe, comme dans le cas de la taille, une « diminution sénile », aux environs de la cinquantaine.

Les écarts de poids sont parfois très grands d'un pays à un autre ; il est des peuplades où l'homme est massif et lourd ; il en est où il est *obese*, par développement des graisses ; cela est souvent en rapport avec le régime alimentaire (Kirghizes, Kalmouks, femmes arabes). Le type *normal*, sous ce point de vue de la *corpulence*, a été défini par Bouchard au moyen du *segment anthropométrique*. On nomme ainsi le quotient du poids du corps (en kilogrammes) par la taille (en décimètres), ou :

$$A = \frac{\text{poids}}{\text{taille}};$$

c'est en somme la masse d'un prisme droit de 1 décimètre.

On trouve :

|                      |  |
|----------------------|--|
| Etat normal.....     | $A = \begin{cases} 3,9 & \text{(femme)} \\ 4,0 & \text{(homme)} \end{cases}$ |
| Maigreur.....        | $A = 3,6$  |
| Obésité.....         | $A = 5,4$  |
| Marasme.....         | $A = 2,9$  |
| Marasme extrême..... | $A = 2,0$  |

(valeur très rare, même dans l'inanition prolongée).

Ainsi un adulte, pesant 63 kilogrammes, et dont la taille est 16<sup>dm</sup>,80, a pour segment anthropométrique :

$$A = \frac{63}{16,8} = 3,87.$$

La valeur moyenne de 4 répond à un *état nutritif* normal.

Walker déduit la longueur du buste  $l$  du poids du corps  $P$ , en écrivant :  $l = kP^n$ , où l'exposant  $n$  et la constante  $k$  ont les valeurs :  $n = 0,33$  et  $0,32$ ;  $k = 23,23$  et  $25,6$ , suivant qu'il s'agit de l'homme ou de la femme. Et il attribue le caractère « anormal » à toute personne offrant un écart de 17 0/0 avec le chiffre calculé (1).

Le poids du corps est un excellent témoin du développement organique; on doit l'étudier, particulièrement, chez les *nourrissons* et les *enfants* (2); chez l'adulte, sa *constance* est une garantie de la réparation suffisante des tissus.

**84. Indices d'endurance.** — Des mesures de taille, de poids et de capacité vitale, on a voulu déduire des indices relatifs à l'*endurance*, à la force physique.

On a déjà mentionné le coefficient thoracique; nous y ajoutons le *coefficient morphologique* : il exprime le rapport du poids à la taille, et ce rapport, chez l'adulte, doit donner normalement 360 grammes par centimètre (3); c'est la limite inférieure. On retrouve ici le segment de Bouchard.

(1) Walker (*Proceed. Roy. Soc. London*, série B, t. 89; novembre 1915).

(2) Pour les enfants des écoles anglaises (Clegg, *The British med. Journal*, n° 47, juin 1911).

(3) Voir *Organisation physiologique*, loc. cit.

Nous avons appelé, d'autre part, *Indice d'endurance respiratoire* le rapport de la capacité vitale par le poids du corps. On doit avoir 5 centilitres par kilogramme, au minimum. Cette valeur s'élève à 6 et 6,50 dans le cas des constitutions robustes ; elle tend vers 4 chez les *prétuberculeux* (1). Et il y a des variations individuelles, étudiées notamment par Demonet, encore que, pour Hutchinson, la capacité vitale suivie assez bien le poids, sauf s'il y a obésité (2).

On fait souvent usage, en médecine militaire, d'un coefficient de robustesse dit *Indice de Pignet*. C'est la relation :

$I = T - (P + C)$ , où la taille T et le périmètre thoracique C sont en centimètres, le poids P du corps en kilogrammes.

D'après Pignet, on a le tableau suivant :

- I intérieur à 10 : Très bon.
- De 11 à 20 : Bon.
- De 21 à 25 : Moyen.
- De 26 à 30 : Faible.
- De 31 à 35 : Très faible.

Au-dessus de 35, l'indice accuse une mauvaise constitution.

Mayet adopte pour C le *périmètre moyen*, c'est-à-dire la demi-somme des valeurs que le périmètre présente à l'inspiration et à l'expiration (3).

Aurelio Costa Ferreira substitue à la relation de Pignet celle-ci :

$$I = \frac{(B + D) 100}{T},$$

acromial, et D la différence des diamètres maximum et minimum de l'avant-bras (4).

(1) Cette question est largement traitée dans Jules Amar, *Les lois scientifiques de l'éducation respiratoire*; Dunod, 1920.

(2) Hutchinson (*loc. cit.*, p. 168); Demonet (*Bull. Soc. d'Anthrop.* 1905, t. VI, p. 5).

(3) Pignet (*Arch. Médicales d'Angers*, 1900); — Lucien Mayet (*Journal médical français*, du 25 sept. 1912).

(4) A. Ferreira (*Antropologia militar, La medicina contemporanea*, 1916; extrait, p. 6).

Il est d'autant plus grand que le sujet est plus robuste.  
On a :

$I' = 26$  chez les athlètes ;

25 : forts ;

29 : faibles.

Messerli modifie également l'indice de Pignet en prenant le périmètre  $B'$  des deux bras (mesuré au milieu du bras tendu). Il écrit :  $I' = B' - \{T - (P + C)\}$ .

Toute valeur positive de  $I'$  est bonne ; toute valeur négative marque la faiblesse, zéro étant la moyenne (1).

Bien qu'il ait vérifié sa formule sur 1.000 conscrits suisses, il ne semble pas que Messerli ait atteint une précision plus grande que ses devanciers. Et nous considérons comme plus significatifs les coefficients thoracique et morphologique, avec l'indice respiratoire.

Toutefois nous mentionnerons l'*Indice barique* de Ruggieri (2), représenté par

$$I' = \frac{P \times 100}{T^3}.$$

La petitesse de cet indice se remarque dans l'adolescence et dure environ trois ans, pour cesser à treize ans chez les jeunes filles, à seize chez les garçons. Elle disparaît tardivement dans le cas des enfants pauvres.

L'indice barique se ressent des influences alimentaires, et parle dans le même sens que notre coefficient morphologique.

**85. Croissance et Inanition.** — L'*inanition* ou le jeûne prolongé abaissent le poids du corps. Un homme qui ne mangeait pas, ne prenant que de l'eau, a perdu 300 grammes le premier jour (Atwater). Après un jeûne *absolu* (abstinence d'eau également) pendant *trente-six heures*, la perte fut de 1.600 à 1.700 grammes dans de nombreuses expériences,

(1) Fr. Messerli (*Arch. sc. phys. et nat.*, t. XLIII, p. 71, janvier 1917).

(2) Giuffrida Ruggieri (*Arch. di fisiologia*, 1918, t. XVI, p. 49).

soit 1.100 grammes par jour ou 2 0/0 du poids total. La mort survenant après une chute de 60 à 50 0/0 de ce poids, on calculerait une résistance à l'inanition de vingt-cinq à trente jours. L'alimentation ayant été simplement *insuffisante*, cette perte de poids fut de 2.350 grammes en treize jours, 180 grammes par jour pour un sujet de 55 kilogrammes (soit environ 0,33 0/0) par vingt-quatre heures (\*) et une résistance totale de cinq à six mois environ.

Toutes ces diminutions dépendent de la nature de l'alimentation et de l'état *antérieur* du sujet.

Sur les jeûneurs professionnels tels que Succi, par exemple, l'*inanition physiologique* abaisse le poids du corps d'une façon régulière. Le graphique est une *hyperbole équilatère*, c'est-à-dire une courbe telle que ses branches se rapprochent indéfiniment des axes des coordonnées sans jamais les toucher; on dit que ces axes sont les *asymptotes* de la courbe; la figure 120 représente trois hyperboles équilatères.

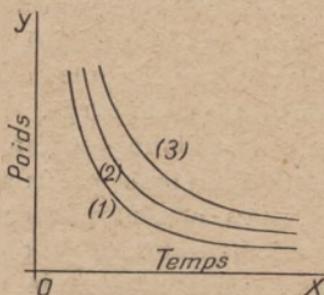


FIG. 120.

La courbe de l'inanition présente, en outre, deux irrégularités : l'une au début, marquant l'apparition de la *faim*, phénomène qui cessera bientôt; mais, au bout de vingt-cinq à trente jours, on reconnaît l'apparition de la *crise*. Dans cet espace de trente jours, Succi perdit les 19/100 de son poids, qui était de 57 kilogrammes environ (2). Des matériaux de l'organisme, ce sont les graisses d'abord, puis les muscles qui subissent les premiers la réduction; les *nerfs* sont mis les *derniers* à contribution, et alors c'est la période dangereuse (Succi prenait de l'eau uniquement).

En un mot, l'inanition atteint les tissus dans l'ordre où ils sont, comme on dit, de plus en plus « nobles »; elle retentit

(1) Jules Amar, *le Rendement de la machine humaine*, p. 79-80, Paris, 1910 (*épuisé*).

(2) Luciani, *Trattato di fisiologia umana*, II, p. 493 et 497; 1910.

moins vite sur les organes moteurs que sur ceux de la nutrition. La *mort*, c'est donc la cessation du mouvement, et « la vie, c'est le mouvement ».

L'inanition doit être particulièrement évitée aux *enfants*, car leur développement en souffrirait, même si on les soumet ensuite à une alimentation abondante : leurs muscles ne se formeraient plus normalement (1).

Les circonstances de la guerre de 1914 ont attiré l'attention sur le problème de la *sous-alimentation*. Dans une série d'expériences, Benedict obtient une perte de 21,5 0/0 sur le poids du corps, en trente et un jours, soit 0,69 0/0 en vingt-quatre heures, ou le double de la proportion trouvée par nous en treize jours seulement (2).

Puis, avec Miles, Roth et Smith (3), ils analysent les effets d'un régime alimentaire réduit sur le rendement humain et la résistance du corps.

On examinera plus loin leurs conclusions (§ 164). Mais on peut déjà retenir que la sous-alimentation affaiblit l'*activité cellulaire*, et généralement toutes les fonctions de la vie. Il y a, selon Lambling, qui observa la population lilloise durant l'occupation allemande, une période initiale d'amaigrissement. Puis on voit l'organisme s'*adapter*, se faire à ce régime de restriction, et paraître n'en point souffrir.

Il n'en est pas moins vrai que cette adaptation fut impossible pour beaucoup de gens qui, à la longue, subirent une véritable déchéance organique, et succombèrent à la *tuberculose*. Sans compter que ceux qui restent ont une aptitude au travail bien diminuée (4).

A ne considérer que la forme du corps humain, l'alimentation réduite et l'inanition retardent la *croissance*.

(1) Hans Aron (*La Nature*, du 4 mai 1912).

(2) Fr. Benedict, *A study of prolonged Fasting*; Washington, 1915, p. 80.

(3) R. Miles (*Journal of nervous and Mental Disease*; vol. 49, p. 208; mars 1919); — Benedict, Miles, Paul Roth et Monm. Smith (*Proceed. Nat. Ac. Sciences*, 1918, t. IV, p. 149), et surtout, *Human Vitality and Efficiency under Prolonged Restricted Diet*; Publication n° 280: Washington, 1919).

(4) Lambling, *Precis de Biochimie*; Paris, 1919; 2° edit.; — S. Pembrey (*Brit. Med. Journ.*, 12 mai 1917).

C'est, du reste, ce que l'on a déjà signalé à propos de la classe pauvre, et ce que la statistique a révélé dans les pays que la guerre a plongés dans des privations continues.

On l'a même vérifié chez les insectes <sup>(1)</sup>, dont la croissance peut être sérieusement retardée en les nourrissant de façon insuffisante (expériences sur *Drosophila*, ou mouche des fruits).

Les retards ou les progrès de la croissance se manifestent sur tous les organes, entre lesquels on peut établir des rapports numériques-intéressants <sup>(2)</sup>. Mais au point de vue qui nous occupe, dans cet ouvrage, deux faits méritent la plus haute considération : L'un est que la *croissance a sa plus grande vitesse au début de la vie*, chez les enfants en bas âge ; autrement dit l'inanition produirait en eux une marche inverse non moins rapide. La seconde conclusion est que les phénomènes nutritifs dominant le cycle énergétique du moteur vivant. On les examinera donc très attentivement.

(1) Northrop (*Journ. of Biol. Chemist.*, octobre 1917).

(2) D'Arcy W. Thompson, *On growth and Form* ; Cambridge, 1917.

---

## CHAPITRE II

### LE MOTEUR MUSCULAIRE ET L'ALIMENTATION

86. I. Le moteur musculaire. Les réflexes. — Le moteur, dans l'économie animale, c'est le muscle, et la *force* est celle de la *contraction*.

Or, la contraction musculaire a pour origine, au point de vue moteur, l'excitation nerveuse; une relation de cause à effet existe entre le mouvement nerveux et le mouvement musculaire, sans que nous puissions en préciser le déterminisme. La contraction est rapide, soudaine, si bien que l'excitation du nerf apparaît comme l'amorce d'une explosion. En outre, que la contraction équilibre une charge sans la déplacer (effort statique) ou qu'elle la mette en mouvement (travail), le muscle *s'échauffe* et prend une température légèrement supérieure à sa température normale, une quantité de *chaleur* plus grande qu'à l'état de repos (muscle relâché) se trouve éliminée. Ainsi le muscle fonctionne comme un *moteur à explosion*; nous verrons plus loin à quels *combustibles* il s'adresse (§ 113).

On réserve le nom de *secousse musculaire* à la contraction isolée, unique; dans une contraction soutenue, il y a plusieurs secousses. Fixons une extrémité du muscle en R, et rattachons l'autre extrémité L à un style inscripteur AO articulé au point O, et dont la pointe frotte sur une surface mobile recouverte de papier enfumé; nous aurons, par *excitation électrique* du nerf N, le tracé ACD *fig. 121*). La durée de la secousse ACD, lue sur l'inscription T du temps, est de *12 à 16 centièmes* de seconde, chez l'adulte; elle est plus grande chez les enfants en très bas âge, et varie suivant des circonstances diverses [température, jeûne (1)].

(1) Patrizi et Mensi (*Giorn. R. Accad. med. Torino*, 1894, p. 61).

Or, à l'instant A de l'excitation, le muscle ne répond pas ; c'est au bout d'un temps AB que commence la *courbe myographique* ; elle comprend donc une *période latente* AB,

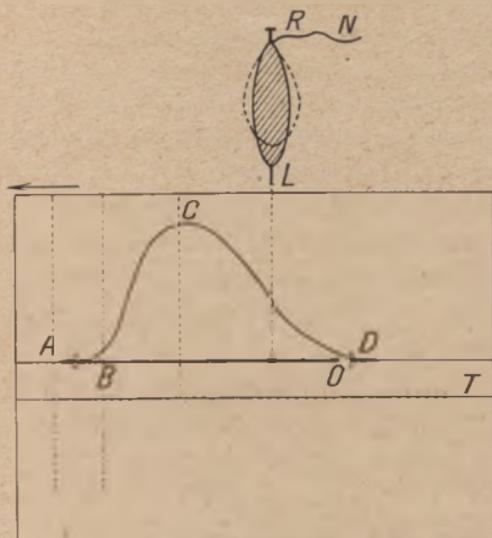


FIG. 121. — Graphique d'une secousse musculaire.

d'environ  $\frac{3}{1.000}$  de seconde d'après les recherches de Tiegerstedt et Burdon-Sanderson<sup>(1)</sup>, une *période ascendante*, généralement plus longue que la période suivante qui est *descendante*.

Lorsque les excitations se suivent à des intervalles moyens de 15 centièmes de seconde, on obtient

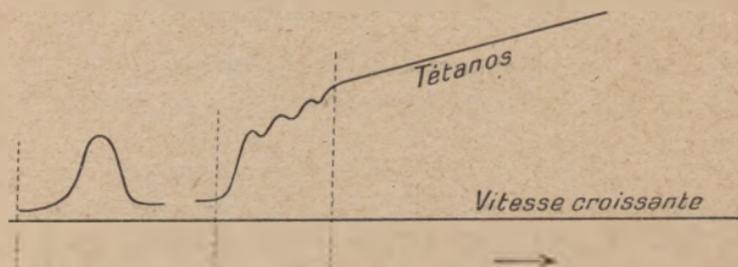


FIG. 122. — Fusion tétanique des secousses.

une série de secousses semblables à celle décrite ci-dessus.

(1) Il semble, d'après les recherches de Piper sur le nerf du biceps brachial, que la période latente soit un peu plus grande :  $\frac{4}{1.000}$  de seconde environ (*Pflueger's Archiv*, t. CXXVII, p. 474, 1909).

Lorsqu'elles se suivent à intervalles de plus en plus rapprochés, elles tendent à *se fusionner* sous une forme d'apparence rectiligne (*fig. 122*) ; c'est le *tétanos physiologique*.

Le nombre de secousses produisant une contraction tétanique, soutenue, varie d'un muscle à un autre, suivant l'âge, la température, la charge sous laquelle le muscle se contracte et enfin son état antérieur. Chez l'homme, il correspond à 20 ou 30 secousses, soit à 20 ou 30 excitations par seconde. Jusqu'à 60 secousses par seconde, le muscle reste tétanisé pendant *quatre à cinq minutes*, puis la courbe redescend ; il y a, dès ce moment, *fatigue* ; la contraction a cessé de se produire d'une façon normale.

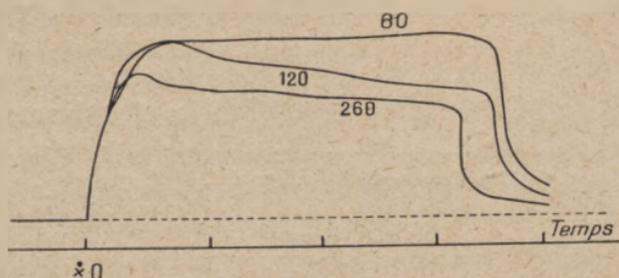


FIG. 123.

Au delà d'une fréquence de 60, la fatigue se manifeste plus vite, comme le montre le graphique (*fig. 123*) de Hofmann<sup>(1)</sup>.

Physiologiquement, le muscle reçoit l'excitation proprement nerveuse ou « volontaire », au lieu de celle du courant électrique ; le nombre de secousses est toujours suffisant pour que naisse la contraction ; celle-ci, *normalement, par voie directe, est donc un véritable tétanos*. Si l'on produit « volontairement » une contraction, l'expérience montre que le muscle rend un *son* correspondant à une fréquence déterminée, et perceptible très nettement au moyen de certains appareils (*myophone*). Il s'ensuit que l'excitant moteur est *périodique* et que, grâce à l'élasticité musculaire, il y a *sommation*, « *addition latente* » des chocs nerveux (voir § 93).

(1) F.-B. Hofmann (*Pfluegers Arch.*, t. XCIII, p. 497 ; 1902).

Malgré cette fusion des secousses, la contraction volontaire est plus rapide que la contraction par choc électrique; elle peut durer  $\frac{6}{100}$  de seconde, soit un maximum de 16 contractions par seconde correspondant chacune à trois secousses (voir § 93).

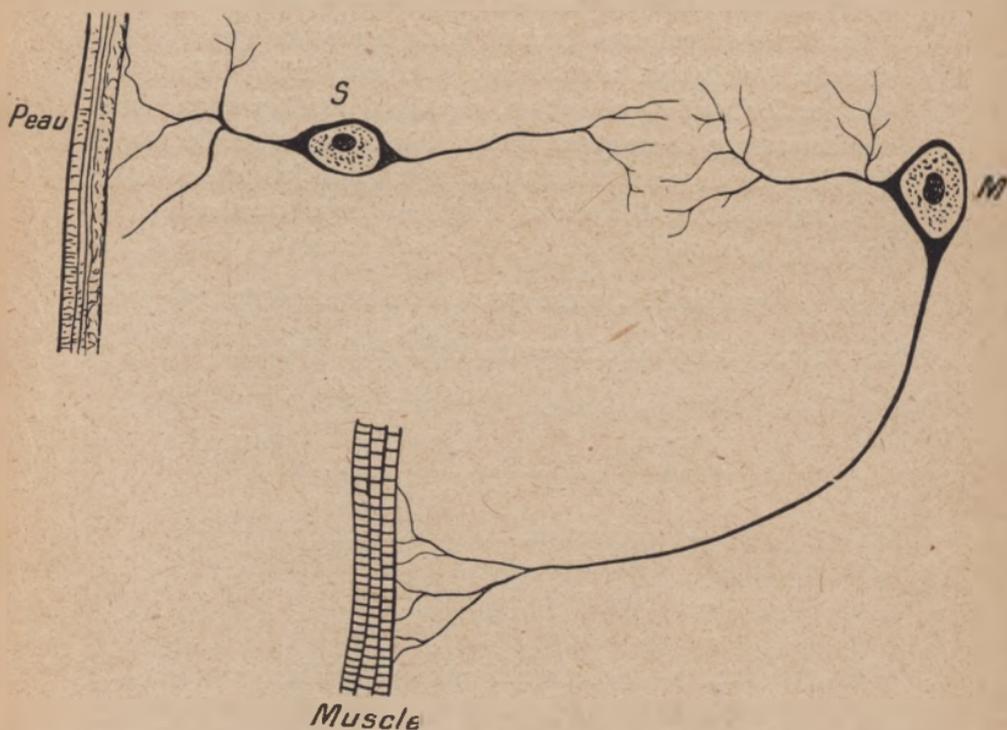


FIG. 124. — Arc réflexe sensitivo-moteur.

Supposons que l'excitation provienne du dehors; tel serait le cas d'une personne mise brusquement en face d'un danger, ou touchant, à l'improviste, un corps brûlant. Dans ces conditions, il se produira un *phénomène réflexe*: les éléments du *neurone sensitif S*, impressionnés par la brûlure de la peau (fig. 124), transmettent la sensation au *neurone moteur M*, lequel agira sur le muscle pour le contracter.

Le mouvement suivra donc la sensation.

L'excitation chemine dans les nerfs à la vitesse moyenne

de 32 mètres par seconde <sup>(1)</sup>; mais la durée totale du réflexe est accrue du fait que, très souvent, plusieurs neurones sont intercalés dans le trajet.

La longueur du trajet est diminuée quand les centres nerveux du mouvement sont ceux de la moelle épinière : c'est ce qui a lieu dans les réflexes simples, et dans les *mouvements automatiques*; il y a moins de relais.

La durée du réflexe diminue aussi à mesure que l'intensité de l'excitation augmente; elle est, enfin, liée à un état particulier d'organisation, *acquis* ou *héréditaire*, qui favorise le passage de ce qu'on appelle l'*influx nerveux*. Le temps qui s'écoule depuis l'instant de l'impression jusqu'à celui où le mouvement se déclenche, c'est le *temps de réaction* ou encore l'*equation personnelle*; et c'est, comme on le voit, un élément qualitatif. Comme quantité, il représente  $\frac{1}{5}$  à  $\frac{1}{10}$  de seconde, suivant les circonstances et les individus.

On donne les moyennes suivantes :

|                       |                  |
|-----------------------|------------------|
| Réaction tactile..... | $\frac{14}{100}$ |
| — visuelle.....       | $\frac{19}{100}$ |
| — auditive.....       | $\frac{15}{100}$ |

Ces valeurs sont légèrement inférieures à la normale ainsi qu'on le verra (§ 166).

**87. Lois de la contraction musculaire.** — La contraction ne consiste pas nécessairement dans le *raccourcissement du muscle*; si la résistance à vaincre est suffisante, le muscle conservera sa longueur (contraction statique *absolue* ou force absolue); mais, en général, il se raccourcit <sup>(2)</sup>, sa section aug-

<sup>(1)</sup> F. Kiesow (*Arch. ital. biol.*, t. XL, p. 273; 1903). — Piper admet 120 mètres, à la suite de ses recherches sur le nerf brachial.

<sup>(2)</sup> Si le muscle, en se raccourcissant, déplace l'objet auquel son tendon est attaché, la contraction est dite *isotonique*. S'il ne le fait pas, par suite d'une grande résistance, la contraction est dite *isométrique*.

mente et sa longueur diminue ; la compensation est telle que le volume ne se modifie sensiblement pas.

Le raccourcissement atteint toutes les fibres ; la force de contraction est donc la somme de ces contractions élémentaires. Chauveau (1) a fait une analyse minutieuse des éléments qui entrent dans l'effort de contraction, suivant la grandeur de la charge et celle du raccourcissement. Nous la présenterons comme suit :

En vertu des lois de l'élasticité, un muscle soutenant une charge  $P$  s'allongera d'une quantité  $l = \frac{PL}{ES}$  (voir § 46). Si, par sa contraction, il résiste à cet allongement, sa force intérieure sera égale et opposée à  $P$ . Mais supposons, en outre, qu'il se raccourcisse d'une quantité  $r$  en soutenant sa charge ; sa force intérieure sera supérieure à  $P$  de l'effort nécessaire pour ramener le muscle à sa longueur primitive ; cet effort supplémentaire sera donc proportionnel au raccourcissement ; ce sera  $P \times r$ . Et la force de contraction statique, pour équilibrer une charge  $P$  avec un raccourcissement  $r$ , aura la valeur totale :

$$F = P + Pr = P (1 + r).$$

Elle équivaut donc à une force élastique  $F$  comprenant la force élastique effective  $P$  et une force élastique disponible  $Pr$ , variant avec le raccourcissement. Il est bien évident que ce serait une économie appréciable de force de raccourcir le muscle au minimum. D'instinct, on observe souvent cette loi : l'ouvrier qui pousse une brouette la soutient sans fléchir les bras, autant que possible.

88. Lors du travail du muscle pour déplacer une charge  $P$ , le raccourcissement prend deux valeurs extrêmes  $r$  et  $r'$  auxquelles correspondent des forces de contraction  $F$  et  $F'$  ; de sorte que la force a une valeur moyenne  $\frac{F + F'}{2} = F_m$ . En remplaçant  $F$  par  $P (1 + r)$  et  $F'$  par  $P (1 + r')$ , il viendra :

$$F_m = P \left( 1 + \frac{r + r'}{2} \right).$$

(1) A. Chauveau (*Comptes Rendus Sciences*, t. CXXVII, p. 983 ; 1898 ; *Journal de Physiologie*, 1899, p. 157).

La *contraction dynamique* effectuée, si l'on veut, un travail dont les deux facteurs sont: le raccourcissement moyen et l'effort moyen  $F_m$ . Mais, suivant que ce travail est *positif* ou *négatif*, l'effort moyen s'accroît légèrement ou diminue d'une *quantité* non fixée *a priori* (1). L'examen de photographies de muscles actifs a révélé à M. Paul Richer que ceux-ci sont plus ou moins gonflés, suivant le caractère moteur ou résistant.

Les lois de l'élasticité ou, plutôt, de la contraction musculaire, Chauveau les vérifia expérimentalement en faisant soutenir la charge à l'avant-bras fléchi sur le bras, et modifiant son degré de flexion ainsi que la valeur de la charge (2). Le dispositif est très satisfaisant (§ 119); sous une forme beaucoup moins parfaite, il avait servi à Donders et Van Mansvelt (3) dans leurs études sur l'élasticité musculaire.

Il est intéressant de citer également ces paroles de Winslow (4), en 1720 : « On sentira, par exemple, le gonflement du biceps augmenter à mesure que l'on fléchit le bras; on le sentira aussi à mesure que l'on le charge de fardeau. De plus le bras étant fléchi à un certain degré, et ensuite affermi dans cette situation par quelque chose, de sorte qu'il ne puisse être ni plus fléchi, ni plus étendu, et étant soutenu de manière que les fléchisseurs ne fassent plus d'effort, et que l'on les sente entièrement relâchés; si, pour lors, il se présente quelque résistance à ce bras pour le fléchir davantage, ou pour l'étendre, on sentira évidemment les muscles se gonfler à *proportion de la résistance*, quoiqu'il ne se fasse aucun mouvement par l'articulation du coude ». Et Winslow distingue « l'action d'effort » de « l'action de ressort » qui est propre à la matière. Le principe des recherches de Donders et de Chauveau est là.

Il est donc démontré que l'effort des muscles augmente à mesure que la contraction réduit leur longueur. Ceci infirme l'opinion contraire de Schwann (1837), sur laquelle on s'était appuyé pour donner à la *Mécanothérapie* des bases physiologiques.

La *loi de Schwann* (5), affirmant que l'effort diminue avec le raccourcissement du muscle, n'est pas exacte.

(1) A. Chauveau (*Journal de Physiologie*, 1900, p. 313).

(2) L'appareil est décrit par Tissot (*J. de Physiol.*, 1899, p. 181).

(3) Donders et Van Mansvelt, *Over de elasticität der spieren*, Utrecht, 1863.

(4) Winslow (*Mém. Acad. Roy. des Sciences*, 1720, p. 87).

(5) Voir Müller, *Handb. d. Physiol.*, 1837, t. II, p. 59: — et une critique de cette loi, à propos de Mécanothérapie, dans Jules Amar, *Organisation physiologique du travail*, p. 140.

89. La déformation musculaire est, d'après les lois de l'élasticité, proportionnelle à la longueur du muscle. Si donc, pour déplacer un os mobile avec une *grande amplitude*, il doit s'y fixer un muscle capable d'une grande déformation, on comprend que des *muscles longs* servent à ces mouvements amples. Par contre, dans les *muscles courts et épais*, le nombre des fibres étant très grand, ceux-ci peuvent développer des efforts considérables. Un coup d'œil sur la musculature (fig. 103, p. 130) permet de s'assurer que non seulement les muscles sont courts ou longs, mais que leurs formes sont très diverses : il en est à fibres parallèles comme les biceps, d'autres à fibres rayonnantes comme le temporal. Ces formes sont des *adaptations fonctionnelles* parfaitement rationnelles ; si le muscle s'attache à deux os éloignés susceptibles d'un faible déplacement réciproque, alors les fibres sont *prolongées par des tendons grêles* ; il y a économie de substance musculaire : tel est le cas des fléchisseurs

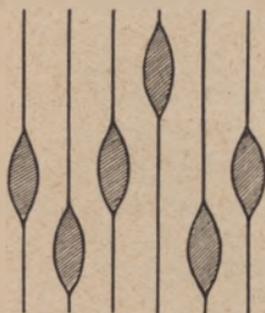


FIG. 125.

des doigts. Si le muscle doit vaincre une grande résistance, ses fibres sont *obliques* — comme il a été dit plus haut (§ 74) — afin de présenter une grande section ; de plus, pour les faibles excursions, ils prennent l'aspect de grains de blé sur le tiers de leur longueur, les deux autres tiers étant de minces tendons : il s'ensuit une section totale considérable et une économie de matière (fig. 125) ; c'est ce qui a lieu dans le *masséter*,

à fibres courtes et parallèles, et qui doit être puissant pour servir à la mastication.

L'adaptation de chaque muscle à sa fonction a été vérifiée par de nombreux auteurs (1). Une observation de Marey est particulièrement intéressante : le *mollet du nègre* est mince et à fibres longues, celui du *blanc* est gros, court et prolongé

(1) Surtout par W. Roux, Marey, G. Weiss. Consulter W. Roux, *Die Entwicklungs-mechanik*, Leipzig, 1905 ; *Vorträge u. aufsätze über Entwickl...* 1905. Marey (*Arch. de Physiol.* 1889).

par un long tendon d'Achille. Or, dans les deux cas, le muscle doit avoir la force de soulever le poids de l'homme. Mareys s'assure qu'étant moins fort chez le nègre, il s'attache à un bras de levier *plus grand*, la saillie du calcanéum (talon) étant en arrière de l'axe de rotation d'une longueur supérieure de 40 0/0. Le savant physiologiste imagina de raccourcir le calcanéum d'un lapin; au bout d'un an, il vit le mollet grossir, c'est-à-dire augmenter de force pour s'adapter à sa fonction.

Des variations fonctionnelles ont également pour siège les *cartilages*, pour qu'ils s'adaptent au travail des organes locomoteurs <sup>(1)</sup>.

Si l'on se demande, enfin, pourquoi la direction du muscle est *presque parallèle* à celle de l'os qu'il doit déplacer, au lieu de lui être à peu près *perpendiculaire*, il sera facile de voir que ce gaspillage de force est corrélatif d'une économie sur l'*espace* occupé par le muscle. Les masses motrices sont réparties dans tout le corps animé sous la loi du *minimum de place*.

90. L'effet utile d'un muscle est donc fonction de sa masse (fibres actives), de son degré de contraction, et de l'angle que sa direction fait avec celle de l'os à mouvoir; à chacune de ses positions, le muscle a un *moment de rotation* déterminé, par rapport à l'axe. Le moment de rotation est

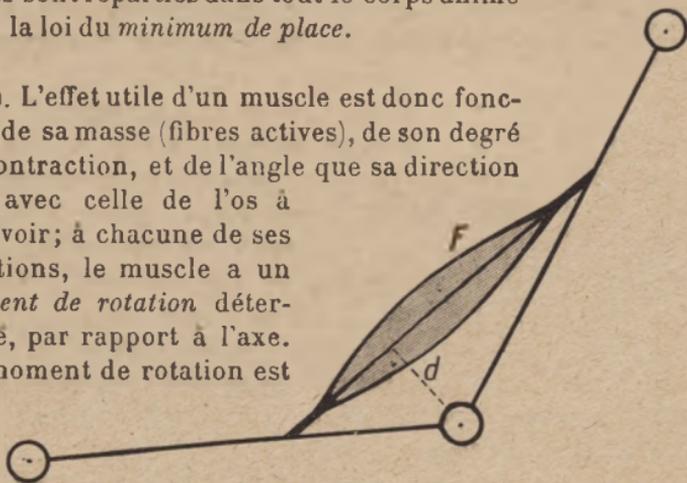


FIG. 126. — Action musculaire.

le produit de la force  $F$  du muscle par la distance  $d$  (fig. 126); on a :

$$\mathcal{M} = F \times d.$$

(1) Retterer (*Comptes Rendus Biologie*, 1908, 1909, 1911, *passim*).

Le raccourcissement modifie  $F$  et  $d$ . De nombreuses mesures du moment de rotation ont été faites par Braune et Fischer<sup>(1)</sup> sur des préparations anatomiques du bras;  $F$  était déduit de la grandeur de la section musculaire; elles démontrent que ce moment varie avec l'angle de flexion jusqu'à une certaine valeur; en particulier, lorsque le bras est bien tendu,  $F$  et  $d$  ont un produit qui n'est pas nul, comme on pourrait le croire. Toutefois les expériences sur cadavre réalisent des mouvements *passifs*, qui ne sont pas toujours l'image fidèle des mouvements *actifs* ordonnés par la volonté.

Il faut, d'ailleurs, considérer que, dans le corps de l'homme, la puissance musculaire actionne des leviers du troisième genre, le plus souvent, qui l'obligent à être *supérieure* à la résistance. Celle-ci est

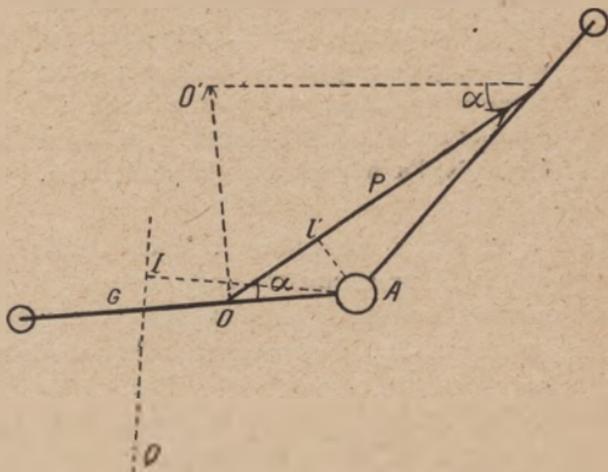


FIG. 127.

supposée appliquée au centre de gravité  $G$  du membre mobile (fig. 127); la composante utile de la puissance sera  $OO = P \sin \alpha$ , c'est-à-dire que l'effort de flexion varie comme le sinus de l'angle d'inclinaison du muscle sur le membre mobile. Le bras de levier  $AI'$  de la puissance est plus petit que celui  $AI$  de la résistance; mais l'amplitude du mouvement de cette résistance est accrue dans le rapport de  $AI'$  et favorise un grand nombre d'actes utiles<sup>(2)</sup>.

La fonction motrice du muscle ne doit pas être abstraite

(1) Braune et Fischer (*Abhandl...*, t. XV, n° 3, p. 247; 1889).

(2) Voltaire, avec sa légèreté ordinaire, reprochait à la nature « la profusion de ses efforts » (Lettre du 17 novembre 1732, à M. Kœnig).

des circonstances du mouvement; « l'action musculaire isolée, comme l'écrivait Duchenne (de Boulogne), n'est pas dans la nature (1) »; il y a coopération de toutes les forces motrices, souvent d'apparence *antagonistes*; le *biceps* fléchit l'avant-bras; le *triceps* en produit l'*extension*; à la vérité, ils coordonnent leur mouvement et combinent leurs efforts; si bien que le véritable groupement des muscles est à base fonctionnelle, physiologique, et non point anatomique. L'association précise, graduelle, nuancée des mouvements musculaires est l'œuvre du système nerveux; *automatiquement*, par effet de l'habitude, elle est rapide, parce que des centres prochains, disposés dans la moelle épinière, en sont chargés; mais, normalement, ceux-ci ne font que l'ébaucher, et les centres cérébraux, plus éloignés, l'achèvent dans la perfection.

91. **Force musculaire : force absolue.** — Nous avons vu que la force du muscle augmente en proportion de son raccourcissement; si on le charge de manière à l'empêcher de se raccourcir, on en mesurera l'*effort absolu* (2). Sur le vivant, on choisit un muscle particulier, de section déterminée; on tient compte du genre de levier auquel il est appliqué, et, au moment où l'on a réalisé les conditions d'effort statique maximum, on calcule la valeur de cet effort. Ainsi, un homme de 70 kilogrammes, chargé d'un poids de 70 kilogrammes, ne peut se redresser quand il est assis sur ses jarrets pliés (3). C'est une résistance de 140 kilogrammes, et l'on a :

$$P \times Ac = Q \times AB; \quad \text{d'où} \quad P = Q \frac{AB}{Ac} \text{ (fig. 128).}$$

Hermann (4), en déterminant avec exactitude le rap-

(1) Duchenne de Boulogne, *Physiologie des mouvements*, p. 811; Paris, 1867.

(2) Dénomination de E. Weber, auteur de nombreuses études sur l'élasticité musculaire, et, avec son frère Wilhelm, d'un traité qui fit époque (?): *Mécanique de la Locomotion chez l'homme*, trad. Jourdan, Paris, 1843.

(3) De la Hire (*Mém. Acad. Roy. des Sciences*, 1699, p. 153).

(4) Hermann (*Arch. f. Physiol.*, t. LXXIII, 429; 1898).

port  $\frac{AB}{Ac}$ , calcule P; il obtient une force qui, par *millimètre carré* de section des muscles du mollet, s'élève à 62<sup>gr</sup>,40.

Sur les fléchisseurs du bras (1), on trouve de 50 à 80 grammes. Le masséter (2) est plus fort : 90 à 100 grammes par millimètre carré. Il y a donc des différences marquées d'un muscle à un autre; la valeur moyenneseerait 75 grammes par millimètre carré de section. Dans aucune espèce animale

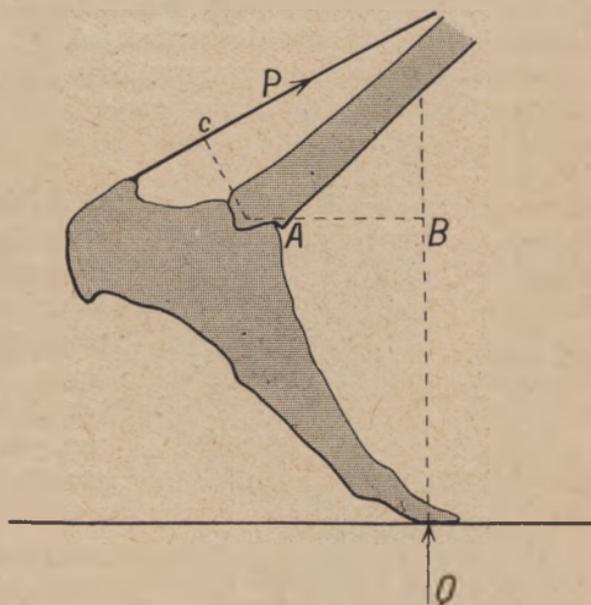


FIG. 128. — Force des jarrets.

on ne dépasse cette force absolue. On détermine la rupture des gastrocnémiens de grenouille sous un poids tenseur de 40 grammes par millimètre carré, et il ne semble pas que les *lésions nerveuses* diminuent cette résistance, du moins à bref délai (3). Il en est ainsi chez les blessés.

Les sujets très robustes, les athlètes dans l'espèce humaine, ont un grand développement musculaire pour produire des efforts considérables; sur le fameux lutteur Cotch Mehmet, les muscles abdominaux avaient une épaisseur triple de l'ordinaire, d'après Manouvrier. On a vu (4) des

(1) Hencke et Knorz (*Zeitsch. f. rat. med.*, t. XXIV; 1865).

(2) Rosenthal (*Physik. med. Soc. in Erlangen*, t. XXVII, p. 85; 1895).

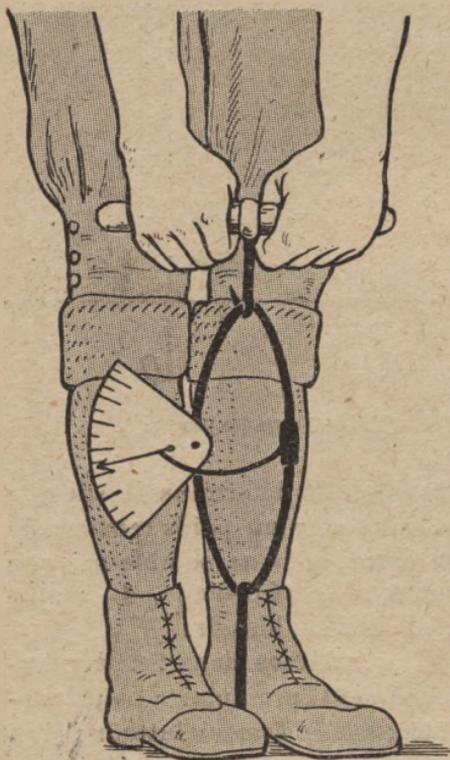
(3) Jules Amar (*Comptes rendus Acad. Sciences* du 19 nov. 1917); — Frey et Springer (*Zeit. f. Biol.*, janvier 1914; t. LXIII).

(4) Désaguliers, *Cours de Physique*, trad. franç., I, p. 300; 1751.

athlètes soulever un rouleau de pierre de 350 à 380 kilogrammes ; et certains hommes de peine (marseillais, siciliens, turcs, tunisiens) offrent une résistance extrême (1). En mai 1922, l'athlète Vasseur souleva 671 kilogrammes, mais pendant cinq secondes seulement.

Quant aux récits de force merveilleuse, ils concernent des « tours d'adresse » (positions particulières des os) ou des supercheries (2).

92. De nombreuses recherches ont été faites en vue de



A

FIG. 129. — Essai de force rénale.

force de traction des deux mains.

connaître la valeur maximum de l'effort que l'homme peut développer avec ses muscles (bras, jambes, « reins », cou). Les mesures manquent de rigueur et d'homogénéité. On a tantôt déterminé des *pressions*, tantôt des *tractions* ; de plus les *dynamomètres* employés étaient différents, de sorte que la prise des mains n'était pas aussi facile sur l'un que sur l'autre. Et enfin les différences individuelles sont très grandes.

Toutefois Désaguliers (*l. c.*), Schultze (3), Gréhan(4) ont obtenu une moyenne de 45 *kilogrammes* comme

(1) Hunauld, Barthez, Amar, etc.

(2) Voir des récits dans Pline, *Hist. nat.*, l. VII, chap. XIX.

(3) Schultze (*Bibliothèque britannique*, t. LVI).

(4) Gréhan (*Comptes Rendus Biologie*, 1897).

Les muscles du cou peuvent supporter jusqu'à 200 kilogrammes sans fléchir, et en moyenne 150 kilogrammes.

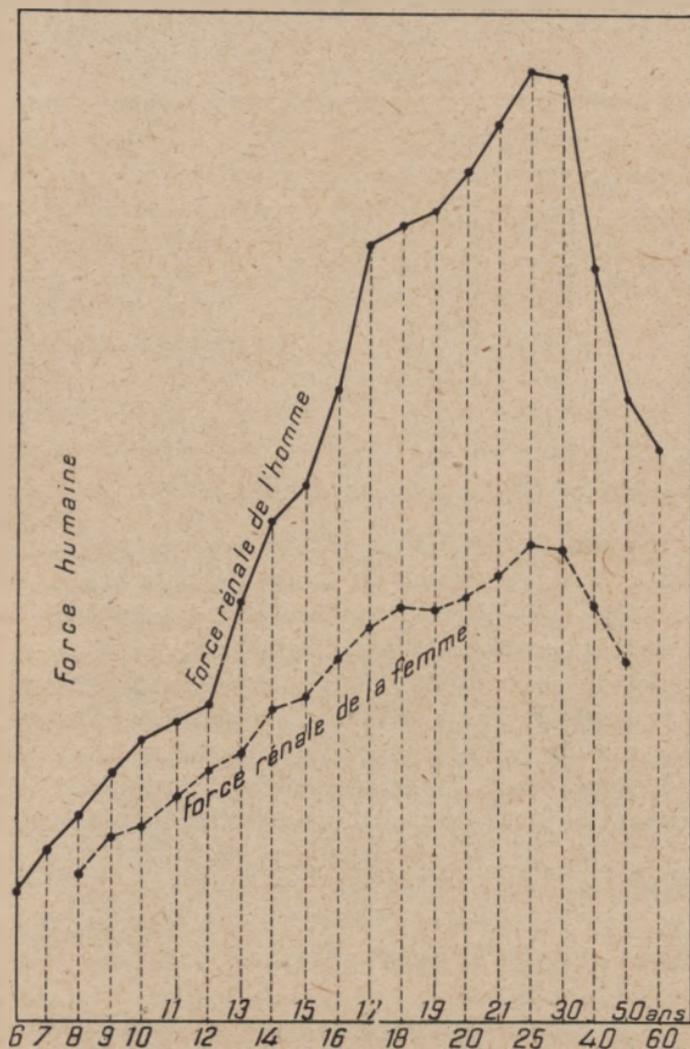


FIG. 130. — Variations de la force rénale avec l'âge.

Quételet (*l. c*) mesura la « force rénale » au moyen du dynamomètre de Regnier (voir § 214) : l'instrument est placé entre les pieds du sujet et fixé au sol ; on tire par l'autre extrémité (*fig. 128*) en se penchant d'abord, puis se redres-

sant. Sur des milliers de sujets, Quételet détermina la force rénale suivant l'âge et le sexe. En voici les résultats pris entre six et soixante ans (*fig. 130*).

## FORCE HUMAINE

| AGE   | HOMME  | FEMME  | AGE    | HOMME | FEMME |
|-------|--------|--------|--------|-------|-------|
| 6 ans | 20 kg. | »      | 17 ans | 126   | 64    |
| 7     | 27     | »      | 18     | 130   | 67    |
| 8     | 33     | 24 kg. | 19     | 132   | 67    |
| 9     | 40     | 30     | 20     | 138   | 68    |
| 10    | 46     | 31     | 21     | 146   | 72    |
| 11    | 48     | 37     | 25     | 155   | 77    |
| 12    | 51     | 40     | 30     | 154   | 77    |
| 13    | 69     | 44     | 40     | 122   | »     |
| 14    | 81     | 50     | 50     | 101   | 59    |
| 15    | 88     | 53     | 60     | 93    | »     |
| 16    | 102    | 59     |        |       |       |

La moyenne pour l'adulte est de 150 kilogrammes chez l'homme, 75 kilogrammes ou la moitié chez la femme. Et l'on constate la diminution sénile de la force déjà aux environs de la quarantaine. L'écart relatif au sexe est lié au développement des muscles, dont la masse est plus grande dans le corps de l'homme que dans celui de la femme, et aussi à une adaptation fonctionnelle meilleure. On le constate, de même, dans l'*effort de serrement* de la main (dynamomètres de pression) : c'est un rapport du même ordre,

$\frac{57}{100}$  d'après Manouvrier. Une caractéristique non moins importante de la force, de l'effort humain, est que l'homme le produit vite avec sa valeur maximum, la femme plus *lentement* (d'après Féré).

Le graphique de Quételet accuse un *retard* de la force sur l'âge entre neuf et treize ans. Grigorescu (1), analysant cette période de l'enfance par des mesures faites dans les écoles, constate un arrêt de croissance de la force entre onze et treize ans.

(1) Grigorescu (*Comptes Rendus Biologie*, 1891, p. 547).

Tandis que sur les Européens on avait le tableau précédent, montrant un maximum de force rénale vers *trente* ans, Gould l'observe vers *trente-quatre* ans chez les Américains blancs (soldats) et *quarante* ans chez les Indiens. Il indique :

| Blancs                 | Nègres                 | Mulâtres               | Indiens                |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 144 <sup>kg</sup> ,400 | 146 <sup>kg</sup> ,700 | 158 <sup>kg</sup> ,300 | 159 <sup>kg</sup> ,200 |

Weisbach a donné des chiffres exprimant l'*effort de pression* des mains chez des peuples asiatiques et nègres; d'une façon absolue, ces chiffres manquent de rigueur, même en tant que valeurs moyennes. Ce qu'il est intéressant de retenir, c'est que de ces mesures et de celles que des explorateurs ont effectuées sur des peuplades variées, il résulte que les nations *civilisées sont plus robustes que les nations sauvages*, mieux développées, sinon plus résistantes à la douleur physique. Les circonstances extérieures ou *de milieu* ont des effets certains sur la force humaine; elles peuvent l'augmenter ou la diminuer. Aussi convient-il d'y avoir une attention particulière, de même qu'à l'âge du sujet appelé à dépenser ses forces.

### 93. Périodicité de la contraction musculaire volontaire.

— Le muscle se contracte, volontairement, d'une manière *périodique*; et la contraction, véritable tétanos, est elle-même *discontinue*, sauf que les diverses *secousses* dont elle est la résultante échappent à la perception. Le « flux nerveux » agit d'une façon *périodique*, et non avec continuité. Cette succession rapide de secousses dans la contraction volontaire a pu cependant être enregistrée; elle n'est donc pas douteuse; elle peut même donner lieu à un *son*. Plaçant, par exemple, un doigt dans la conque de l'oreille, et contractant fortement le biceps, on entendra ce son: les secousses seraient au nombre de 50 par seconde environ <sup>(1)</sup>. Dans la contraction du masséter <sup>(2)</sup> (mâchoires), on en aurait

<sup>(1)</sup> H. Piper (*Pflug. Arch.*, 1909, t. CXXIV, p. 591; *ibid.*, t. CXXVII, p. 474; et *Arch. f. Anat. u. Phys.*, 1910, p. 207); — Carlo Foa (Congrès de Physiologie de Vienne, 1910, C. R., p. 68).

<sup>(2)</sup> P. Hoffmann (*Pflug. Arch.*, t. CXXIV, p. 344). Helmholtz avait trouvé autrefois de 35 à 40 secousses, au lieu de 60. Mais il faut dire que ce nombre varie suivant les individus, et aussi avec la taille.

60 à 65; et pour les muscles fléchisseurs des doigts, de 8 à 11 suivant le doigt considéré (1), etc.

La contraction volontaire a donc le caractère d'un *tétanos physiologique*, quelle que soit, d'ailleurs, sa rapidité, car trois ou quatre secousses fusionnées réalisent le *tétanos* dont il s'agit. Ainsi, il part des centres nerveux une série d'excitations qui harmonisent les infimes contractions des fibres musculaires en une grande contraction, dite volontaire. Trèves a montré, en outre, que le rythme de ces secousses invisibles ne se modifie pas quand le muscle soutient une faible ou une grande charge (2) : seule la *fatigue* pourrait le changer, le ralentir (Piper).

L'effort statique se ramène, d'après ces considérations, à un véritable mouvement vibratoire, c'est-à-dire à un *travail intérieur*. Il faut en définitive dépenser du travail pour produire un effort, et c'est de quoi nous avons des exemples : 1° un corps de pompe où glisse un piston chargé est réuni à une conduite d'eau où règne une pression ; le piston ne descendra pas grâce au *flux stationnaire*, au travail de l'eau (3). C'est ainsi que la pression d'un jet d'eau peut maintenir une porte fermée.

2° En écrivant que le travail d'élasticité de traction est (249) :

$$\mathcal{C} = \frac{1}{2} \frac{ESl^2}{L} = \frac{Fl}{2},$$

la dérivée de ce travail par rapport à la déformation sera :

$$\frac{d\mathcal{C}}{dl} = \frac{ESl}{L} = F;$$

donc l'effort est la dérivée de l'énergie (4).

94. La contraction du muscle, avec son caractère té-

(1) Canney et Tunstall (*Journal of Physiol.*, t. VI, p. xvii; 1885); Schaeffer (*ibid.*, t. VII, p. 111; 1886); — Griffiths (*ibid.*, t. IX, p. 39; 1888).

(2) Z. Treves (*Arch. ital. Biol.*, t. XXXIII, p. 87; 1897); Simonelli et Coop (*Ann. di Neurol.*, t. XVIII, p. 310; Naples, 1900).

(3) Gariel, *Traité de Physique biologique* d'Arsonval, Gariel, etc., t. I, p. 994; 1901.

(4) Lebert (*Comptes Rendus Acad. Sciences*, 1904, p. 1481).

tanique quand elle est volontaire, est *alternative*, comme les coups de piston dans une machine à vapeur. Le nombre d'alternances peut varier dans de larges limites, et correspondre à des *rythmes* différents. Ainsi, au repos du sujet, le cœur fait 70 contractions par minute environ : c'est son rythme propre.

Le *rythme maximum* a été déterminé pour plusieurs organes : les *doigts* peuvent frapper de 8 à 9 coups par seconde, soit 480 à 540 par minute ; on s'en assure par un enregistrement électrique, le doigt fermant un circuit en frappant une surface métallique (1) ; la mâchoire donnerait tout au plus 360 contractions, le pied 210 flexions par minute (2) ; le gros orteil fait un peu plus que le pied, environ 250 coups (3) ; l'avant-bras 230 à 240 flexions, la jambe 120 (contre la cuisse).

On peut déduire de ces faits que le travail des doigts est le plus rapide, ce qui est conforme à l'expérience ordinaire, on en déduira également, sans hésitation, qu'il y a un rythme spécial à chaque muscle ou groupe de muscles.

Sur la vitesse du mouvement des *articulations*, les résultats ne sont pas moins curieux : les phalanges donnent tout au plus 300 à 400 coups à la minute, le poignet 690, le coude 530, l'épaule 310. Ainsi le poignet et le coude, en action dans l'écriture, les travaux de couture, sont plus rapides que l'épaule ou les doigts (4).

Ces vitesses limites varient avec l'âge ; de six à seize ans, elles varient dans le rapport de 2 à 3, avec un retard entre douze et treize ans (comme pour le poids et la force du corps).

L'exemple du cœur, qui est infatigable au taux de 70 battements par minute, montre qu'il doit exister un rythme d'infatigabilité musculaire, un *rythme normal*. En voici

(1) Von Kries (*Arch. f. anat. u. Physiol.*, Suppl. B, 1886, p. 6) ; Dresslar (*Amer. Journ. of psychol.*, t. IV, p. 514 ; 1892) ; Bryan (*ibid.*, V, p. 123).

(2) Von Kries (*loc. cit.*).

(3) Davis (*Studies from the Yale Psychol. Lab.*, t. VI, p. 11 ; 1898).

(4) Bryan (*Amer. Journ. of Psych.*, IV, 514 ; 1892) ; — Jules Amar (*Journal de physiol. et de pathol.*, sept. 1915).

quelques valeurs se rapportant aux muscles *non chargés* :

|                             |          |
|-----------------------------|----------|
| Avant-bras sur le bras..... | 30 à 35  |
| Muscles masticateurs.....   | 90 à 100 |
| Doigts.....                 | 150      |
| Cœur.....                   | 70       |

Nous verrons plus tard (§ 120) que le *rythme normal* doit s'abaisser quand les muscles sont chargés.

Eu égard à la taille, les sujets de petite taille sont *relative-ment* plus forts que les grands, et plus rapides, car le *poids* diminue comme le cube, ayant pour *dimensions l<sup>3</sup>* (§ 66), tandis que la *force* diminue seulement comme le carré, étant proportionnelle à la section du muscle (voir *Similitude*, § suivant). Borelli disait déjà : « *Quo minora sunt animalia eo majores faciunt saltus* (1). » Un exemple intéressant (2) de variation du rythme normal inversement à la taille est celui des muscles masticateurs :

|                     |          |                         |
|---------------------|----------|-------------------------|
| Bœuf.....           | 70       | contractions par minute |
| Cheval.....         | 75       | — —                     |
| Homme.....          | 90 à 100 | — —                     |
| Chien de chasse.... | 102      | — —                     |
| Chat.....           | 162      | — —                     |
| Lapin.....          | 240      | — —                     |
| Cobaye.....         | 300      | — —                     |
| Souris blanche....  | 350      | — —                     |

La même loi se vérifie nettement dans le cas des battements d'ailes sur diverses espèces, depuis l'aigle — 50 à 60 par minute — jusqu'à la mouche : près de 20.000 (Marey).

La vitesse est, en général, plus faible dans le sexe femelle.

Quant aux causes profondes qui déterminent le rythme, elles sont doubles : d'une part l'excitation nerveuse se ralentit ou s'accélère suivant les résistances à déplacer ; d'autre part, la fibre musculaire se répare dans les intervalles de repos, et les conditions de cette réparation ne sont pas identiques pour tous les muscles. D'après Chauveau, l'œuvre réparatrice consiste purement à rétablir les *propriétés élastiques* de la matière, à créer de la force élastique

(1) Borelli, *De motu animalium*, 1710, éd. de Leyde, p. 181.

(2) V. Succeschi (*Verworn's Zeitsch., f. allg. physiol.*, t. II, p. 482 ; 1903).

ou force de contraction; tout le *travail physiologique* intérieur, qui ne s'arrête jamais dans les cellules vivantes, prépare cette œuvre définitive.

95. *Similitude des machines.* — On fait souvent application, dans le calcul des machines, d'une notion introduite dans la science par Newton<sup>(1)</sup>, et à laquelle Galilée, plus anciennement, avait songé; c'est la notion de *similitude* (*similis*, en latin : semblable). Elle permet d'étudier une machine d'après un *modèle réduit*. C'est ce qu'on fait, par exemple, pour les *carènes* des navires, pour les surfaces d'aéroplanes, etc. Les modèles réduits de carènes sont, généralement, à l'échelle de  $\frac{1}{16}$ .

Supposons que  $L$  soit la *longueur* du bras d'une statue, et  $l$  celle du même bras sur un modèle réduit. On donne au quotient de  $\frac{l}{L} = r$  le nom de *rapport de similitude*. Entre deux surfaces, ce rapport sera, évidemment :  $r^2$ , à cause de la *dimension* (§ 66), et entre les *volumes* il sera  $r^3$ . Donc :

$$\frac{s}{S} = r^2; \quad \frac{v}{V} = r^3.$$

Par exemple, la surface du corps humain varie comme le *carré* de sa longueur (taille); mais le volume varie suivant le *cube*; de sorte que ce volume diminue plus vite que la surface quand on considère les tailles de plus en plus petites : c'est ce que nous avons déjà dit.

De même, la hauteur des bustes étant égale, les sections seront, de l'homme à la femme, comme les carrés des périmètres thoraciques.

On a :

$$\frac{68^2}{92^2} = \frac{55}{100}$$

Et c'est le rapport que l'on a entre les capacités vitales des deux sexes (§ 80 et 81).

Considerant deux machines fabriquées avec des matériaux *identiques*, on aura pour les *masses* ou les *poids* le même rapport que celui des volumes. Donc  $\frac{m}{M} = r^3$ . S'il n'y a pas identité des matériaux,  $\frac{m}{M} = \mu$  : c'est le cas général.

La notion de similitude s'étend aussi au *mouvement* des machines. Entre les *durées*  $t$  et  $T$  nécessaires pour décrire deux figures semblables, on a le rapport  $\frac{t}{T} = \theta$ .

(1) Newton, *Philosophia Naturalis*, liv. II, section I, propos. 32.

De même, les vitesses  $u$  et  $U$  étant, par définition,  $u = \frac{l}{t}$ ,  $U = \frac{L}{T}$ , on aura :

$$\frac{u}{U} = \frac{l}{L} \times \frac{T}{t} \quad \text{ou} \quad \frac{u}{U} = r \times \frac{1}{\theta} = \frac{r}{\theta}.$$

Enfin, les accélérations  $\gamma$  et  $\Omega$ , qui expriment  $\frac{u}{t}$  et  $\frac{U}{T}$ , seront entre elles comme :

$$\frac{U}{u} \times \frac{t}{T}, \quad \text{ou} \quad \frac{\gamma}{\Omega} = \frac{r}{\theta} \times \frac{1}{\theta} = \frac{r}{\theta^2}.$$

Donc, si deux portions semblables de la machine et de sa réduction prenaient les accélérations  $\gamma$  et  $\Omega$ , sous l'action des forces  $f$  et  $F$ , on aurait  $\frac{f}{F} = \frac{m\gamma}{M\Omega}$  par définition (§ 20); d'où :

$$\frac{f}{F} = \mu \times \frac{r}{\theta^2}, \quad \text{soit} \quad \frac{f}{F} = \varphi = \mu \frac{r}{\theta^2}.$$

Cette dernière relation porte le nom de *loi de similitude de Newton*. Les applications sont très simples :

Les vitesses du modèle et de la machine sont entre elles comme les durées  $\frac{t}{T} = \theta$ . Nous déduirons  $\theta$  de la formule de Newton en supposant des matériaux identiques. Alors  $\frac{f}{F} = r^3$  et  $\mu = r^3$ ; d'où :

$$r^3 = \frac{r^4}{\theta^2}, \quad \text{ou} \quad \theta = \sqrt{r},$$

le rapport des vitesses est égal à la racine carrée du rapport des dimensions, donc :

$$\frac{u}{U} = \theta = \sqrt{r}.$$

Par exemple, les vitesses de contraction des muscles, ou le *rythme* (§ 94), quand on compare un adulte de 1<sup>m</sup>,69 à un enfant de 1<sup>m</sup>,44, seront dans le rapport :

$$\sqrt{\frac{144}{169}} = 0,923.$$

La vitesse diminue donc assez peu avec la taille.

Examinons les pressions exercées par les forces (telle que la pression de la vapeur); elles sont proportionnelles aux surfaces qui les subissent, c'est-à-dire à  $r^2$ ; donc :

$$\frac{f}{s} = \frac{F}{S} = \frac{r^3}{r^2} = r.$$

Ainsi les tensions par *unité d'aire* sont dans le rapport de similitude  $r$ .

Si nous comparons les forces musculaires, sans égard aux sections des muscles, nous écrirons :

$$\frac{f}{F} = r^3, \quad \text{ou} \quad \left(\frac{144}{169}\right)^3 = 0,618.$$

Et comme les poids des sujets sont tels que  $\frac{m}{M} = r^3$ , il s'ensuit que

$$\frac{f}{F} = \frac{m}{M} = 0,618;$$

les forces musculaires sont donc proportionnelles aux poids des individus, ou au cube du rapport des tailles.

A vrai dire, la notion de similitude est ici quelque peu en défaut, et cela tient, fort probablement, à la non-identité des matériaux organiques d'un âge à un autre. L'application de la loi de Newton n'est donc pas sans nécessiter une prudence extrême. Et comme nous l'avons toujours proclamé, il convient de consulter, avant tout, l'expérience. C'est par expérience que Martine, en 1720, reconnut entre les forces musculaires la relation  $\frac{f}{F} = r^4$  : le rapport des forces est égal à la 4<sup>e</sup> puissance du rapport des tailles (1); c'est une relation plus conforme aux données de l'expérience que celle que nous avons déduite de la formule de Newton.

**96. II. L'alimentation, le combustible.** — Tout moteur, pour fonctionner et produire du travail, doit être *alimenté*. On l'alimente grâce à une source d'énergie, et si l'on veut qu'il soit toujours *en pression* (cas d'une machine à vapeur), toujours « au seuil du fonctionnement », la source d'énergie devra être permanente.

Dans les moteurs thermiques, l'énergie *depensée* est de nature calorifique; elle se développe au cours de la *combustion* d'une substance *carbonée* (houille, pétrole, benzol, alcool, etc.). Toute combustion est nécessairement productrice de chaleur, *exothermique*. Ainsi 1 gramme de houille brûlant à l'air libre, fournit 7,50 grandes calories, en moyenne.

Mais le *combustible* n'est qu'un des facteurs de la combustion; l'autre facteur, c'est l'*oxygène*, gaz *comburant* contenu

(1) Martine, *De similibus animalibus*, propos. 24 et 25.

dans l'air au taux de 21 0/0 en volume (1). Il faut donc, sur la grille d'un foyer, la présence simultanée du combustible et du comburant ; il la faut ininterrompue pour que le moteur ne s'arrête pas, et en quantité suffisante.

L'action de l'oxygène, ou l'*oxydation*, est un phénomène généralement violent, accompagné de flammes, une *combustion vive* ; elle produit beaucoup de chaleur en très peu de temps, ce qui conduit à des températures assez élevées.

Dans le moteur vivant, le combustible est l'*aliment*, et le phénomène de combustion porte le nom de *nutrition*. On réserve à toute la série des transformations qui marquent l'évolution de l'aliment dans l'organisme, le nom de *métabolisme*. Aucune différence ne doit être faite entre la combustion du charbon sur la grille d'un foyer et celle de l'aliment à l'intérieur de nos cellules. Si la houille pouvait être brûlée dans notre corps, elle y développerait autant de chaleur que sous une chaudière. Si l'alcool s'oxydait dans nos organes, il mettrait en liberté la même quantité de chaleur qu'en s'oxydant sous l'étincelle d'un carburateur d'automobiles. Sur ce point, la discussion, — longtemps ouverte entre les savants — est close définitivement. Combustion intra-organique et toutes autres combustions qu'on voudra sont de nature identique : ce sont des oxydations.

Toutefois la combustion organique est *lente* ; elle ne s'accompagne donc pas de lumière ni d'élévation de température. Il suffit de noter qu'elle a lieu chez tous les êtres vivants — animaux et végétaux — presque à toute température, et pour l'homme vers 37°. Cet extraordinaire phénomène d'une réaction lente, s'effectuant à basse température, s'explique par la présence dans les tissus vivants d'agents oxydants. Leur rôle est de servir d'*amorce*, ou, peut-être, d'apporter la faible quantité d'énergie qu'une étincelle apporterait aux poudres explosives. Ces *oxydases* ont pu être isolées, mais leur constitution demeure obscure.

(1) Nous faisons abstraction des corps qui, dépourvus d'oxygène, sont capables, néanmoins, de développer une grande quantité d'énergie : corps dits *explosifs*.

97. Bien que le caractère *exothermique* des réactions d'ensemble de l'organisme soit indiscutable, et que la réalité de la combustion cellulaire ne fasse non plus aucun doute, un trait fondamental distingue les êtres vivants de tous nos foyers de chaleur. Ici, *l'aliment est indifférent, pourvu qu'il brûle*. En eux, au contraire, *n'est aliment que ce que les cellules ont pu assimiler, élaborer d'une certaine manière*.

Le combustible est mis à l'état de *réserve* par l'organisme, et ainsi il peut subir l'oxydation lente pour former la source de toutes les énergies de l'être. Si la mise en réserve n'est pas possible, la substance est rejetée : ce n'est pas un aliment.

Ce fait capital est démontré — d'abord expérimentalement — ensuite au cours du *jeûne* où l'on voit le sujet, un adulte par exemple, vivre sur sa propre substance, *vivre*, c'est-à-dire développer chaleur et travail, sans faire appel à l'aliment du dehors.

De même que nos tissus constituent, dans une large mesure, une réserve alimentaire, de même les aliments représentent un apport nécessaire qui comble la perte et accroît les disponibilités.

C'est en ce sens que le mot de Claude Bernard est vrai : « Le muscle est une machine en perpétuelle rénovation <sup>(1)</sup> », et que Chauveau a pu écrire : « Ce n'est pas ce que l'on mange *actuellement* qui fournit l'énergie employée aux travaux physiologiques de l'organisme, mais bien le *potentiel* fabriqué avec ce que l'on a mangé *antérieurement* <sup>(2)</sup>. »

Il résulte de cette indépendance relative des organismes à l'égard de l'alimentation du moment un fonctionnement plus régulier, une vie sans à-coups, à l'abri des accidents de la consommation qui, sur les moteurs usuels, seraient fatals en produisant leur arrêt complet.

L'élaboration préalable de l'aliment sans laquelle pas de nutrition vraie et pas d'énergie, son utilisation ensuite, c'est ce que nous avons désigné par l'expression : *travail ou*

(1) Cl. Bernard, *les Phénomènes de la vie communs aux végétaux et aux animaux*, t. II, p. 506-559; 1879.

(2) A. Chauveau, *la Vie et l'Energie chez l'animal*, p. 50; 1894. Cela explique l'erreur qui consiste à alimenter les ouvriers *quelques instants avant* leur travail et à le faire à six heures du matin. Cette erreur fut relevée par nous (C. R. Ac. Sc., juillet 1917).

*énergie physiologique* (Chauveau). Le travail physiologique totalise toutes les réactions profondes de la vie, quel que soit l'état des muscles, au repos ou en activité.

Chez l'homme, ce travail profond, intime, exige les conditions déjà définies à propos de la matière vivante en général (§ 67) : chaleur, oxygène, humidité, aliments.

La température du corps est assurée par les phénomènes exothermiques de l'organisme dont, réciproquement, elle favorise le cours.

L'oxygène a pour véhicule le sang qui s'en charge aux poumons.

Le corps de l'homme contient 60 0/0 d'eau environ et en perd 2 à 3 kilogrammes par jour, au repos. Si ce liquide venait à faire défaut, il résulterait des troubles respiratoires et cardiaques, et souvent des altérations du tissu nerveux (1).

Avec les aliments — dont nous parlerons en détail — il faut à l'organisme des *sels minéraux*, surtout du *sel marin*.

Celui-ci règle la *concentration* des liquides organiques dans lesquels vivent nos cellules ; il fournit au suc gastrique sa propriété acide et collabore, avec l'eau, à conserver l'état élastique des tissus. Les *sels de chaux* (phosphates, carbonates) consolident le squelette dans sa période de croissance et participent aux phénomènes physico-chimiques de la vie. Cela est si vrai que l'insuffisance ou l'absence de sels (*inanition minérale*) déterminent le ramollissement et la déformation des os, ou même des accidents graves pouvant se faire sentir sur le système nerveux (2). Enfin, à d'autres corps minéraux il semble qu'on puisse assigner un rôle d'*excitants* cellulaires, rôle incontestable dans la vie des microorganismes ; tels seraient le fer, le manganèse, le zinc, etc. (3).

(1) Pernice et Scagliosi (*Rif. méd.*, n° 39 ; 1893 ; *Il Pisani*, fasc. II, 1895).

(2) J. Forster (*Arch. f. Hygiène*, 1885, et *Zeitsch. f. Biol.*, 1873, t. IX, p. 297 et 381 ; 1875, t. XII, p. 464).

(3) C'est ainsi qu'un champignon, l'*Aspergillus niger*, forme 1 gramme de végétal en détruisant 3 grammes de sucre, s'il se développe dans un liquide pourvu d'une trace de zinc. Mais, en l'absence de ce métal, il exigera 28 grammes de sucre : la cellule est alors moins croissante. Le zinc abonde d'ailleurs à la naissance et paraît intervenir dans les phénomènes de *sexualité*, selon Bertrand et Vladesco (*Comptes Rendus Acad. Sc.* 1921, t. CLXXIII, p. 54 et 178) ; et G. Bertrand (*Ibid.*, 5 février 1912).

L'homme a besoin de 25 à 30 grammes de sel marin par jour, qu'il trouve, ainsi que les autres sels, dans son alimentation.

En remarquant le rôle *matériel* des diverses substances que nous venons de signaler (eau, sels), il sera permis de dire que ce ne sont pas de vrais *aliments*, ce ne sont point des *combustibles*. Pour utiles, indispensables qu'elles soient, leur valeur énergétique est nulle. Et nous répéterons que l'*aliment est tout corps capable de constituer une réserve cellulaire pour développer ultérieurement de l'énergie*. Mais il n'est pas interdit de croire que des traces infimes de *corps radioactifs* servent comme des *diastases* digestives.

98. **Géophagie.** — Dans certaines peuplades, c'est une habitude d'absorber des matières terreuses, sans valeur alimentaire. Cette *géophagie* se rencontre au Sénégal, à la Nouvelle-Calédonie, à Calcutta, en Perse, en Bolivie, dans l'Amérique du Sud, à Java. En Espagne, même (1), on observe des « mangeurs d'alcarazas » (terre cuite), et les femmes prétendent se donner ainsi un teint parfaitement blanc (!)... Aux Antilles, ce fut une manie des gens de couleur (2).

Montaigne disait déjà avoir vu des femmes « engloutir du sable, de la cendre, et se travailler à point nommé de ruiner leur estomac, pour acquérir les pâles couleurs (3) ».

En 1837, de Humboldt souleva la question de la géophagie en ces termes : « Les infusoires fossiles ont été mangés en Laponie pendant le temps des grandes disettes... Ils me firent penser à une substance minérale vulgairement appelée *Bergmehl* (farine de montagnes), analysée et décrite par M. Berzélius. Cette farine de montagnes renferme de la silice, une *matière animale*, et de l'acide crénique.

Les Lapons mêlent le *Bergmehl*, dans les grandes famines, à leur farine de céréales et d'écorce pour en faire du pain.

Les infusoires sont mangés à Degerfors, je ne dis pas qu'on s'en nourrit (4). »

Sur ce sujet, le physicien Biot cite, d'après son fils, un article de l'Encyclopédie japonaise (livre 61) où il est fait mention du *Chi-mien* (farine de pierre). Le *Pen-Tsao-Kang-Mou* (recueil chinois de 1875) dit : « La farine de pierre n'est pas une production ordinaire : c'est une matière miraculeuse. Quelques-uns disent qu'elle naît en temps de famine. A diverses époques (744, 809, 1062, 1080),

(1) Hellwald, *Ethnogr. Rosselsprünge*, Leipzig, 1891, p. 168.

(2) De Jonnés (*Annales maritimes*, 1816, t. III, p. 40).

(3) Montaigne, *Essais*, t. I, p. 231 (édit. Leclerc).

(4) *Comptes Rendus Acad. Sc.*, 1837, t. IV, p. 293.

des pierres se décomposèrent et devinrent farine... et furent mangées par les pauvres gens ».

Rapportons encore cette relation de Wallot, de Dijon : « Lorsque en 1795 je suivais à Strasbourg les cours très instructifs du Pr. Hermann, ce naturaliste nous apprit que, dans les temps de disette, les paysans ramassaient une substance terreuse désignée sous le nom de *farine fossile*, la mêlaient avec de la bonne farine, et en faisaient du pain, qu'ils mangeaient au grand détriment de leur santé.... Même propriété, ajoutait-il, est attribuée à la glaise. On devrait pourtant se rappeler que, du temps des Croisades, les armées catholiques perdirent une immense quantité de soldats, parce qu'on leur fit manger de cette farine fossile. »

Et Wallot rappelle que Nicolas Lang avait parlé d'une *chair fossile*, ajoutant : « On ne peut nier qu'il se forme de la chair dans le sein de la terre. J'en ai été fréquemment témoin dans les jardins de Lauffenbourg, sur le Rhin. Elle se trouve à la profondeur d'un ou deux pieds, quelquefois plus; elle est connue sous le nom de *Gegrabenes Fleisch* ou *Erd-Fleisch* (1). »

La géophagie est une survivance des époques où les guerres engendraient les pires famines; elle doit disparaître devant les progrès des communications et du sentiment de la solidarité humaine.

On serait aussi fondé à croire que la géophagie est l'exagération d'un stimulant mécanique apporté à la digestion par des corps durs : c'est, du moins, ce qui a lieu chez les oiseaux. — D'après Baudouin, la géophagie aurait existé chez l'homme primitif, attendu l'usure constatée sur ses dents (2).

**99. Classification des aliments.** — Nos aliments sont généralement complexes; ainsi le pain est formé d'*amidon* et de *gluten*, substances parfaitement définies auxquelles on donne le nom de *principes immédiats*. De même la viande est constituée par un principe analogue au gluten, un autre qui dérive de l'amidon, et par de la graisse. En résumé, tout aliment est formé d'un ou de plusieurs principes immédiats.

Ceux-ci sont au nombre de *trois espèces* : les uns de l'espèce des sucres et de l'amidon, et contiennent du carbone associé

(1) Biot (*C. R.*, 1837, t. IV, p. 304); Wallot (*ibid.*, p. 590).

(2) Baudouin (*Comptes Rend. Acad. Sc.*, 29 janvier 1912, p. 297).— L'auteur admet que les hommes de l'âge de la pierre (époque néolithique) mastiquaient des aliments très chargés en grains de sable. Les enfants géophages du Laos siamois ont, aujourd'hui, les dents usées comme les enfants de l'époque néolithique.

à de l'oxygène et de l'hydrogène dans la proportion de l'eau ; on les appelle, pour cela, les *hydrates de carbone*.

La seconde espèce est également relative à des principes ternaires où domine l'hydrogène : ce sont les *graisses*.

Enfin, dans la troisième espèce alimentaire rentrent tous les principes *quaternaires* qui renferment de l'azote en plus des autres éléments. On les nomme les *protéiques*, les *azotés*, ou encore — pour rappeler que l'albumine en fait partie — les *albuminoïdes*.

La combustion d'un principe immédiat développe de la chaleur, un nombre de calories bien déterminé par gramme de matière. Ce nombre mesure — comme nous l'avons déjà dit (§ 36) — la *chaleur de combustion*. Et ces déterminations se font, dans la pratique, en brûlant un poids de matière, avec de l'oxygène, dans un appareil spécial : *bombe calorimétrique de Berthelot*, ou de Fery. L'opération est violente et complète. Mais nous savons que, dans l'organisme, les réactions sont moins vives ; en outre, l'aliment n'est pas *entièrement utilisé* ; il laisse un résidu capable de libérer encore de l'énergie ; les transformations digestives ne conduisent pas au foyer cellulaire l'intégralité de l'aliment absorbé. Aussi, chaque principe, chaque substance ou mélange de substances possèdent-ils des *coefficients de digestibilité*, ou mieux des *coefficients d'utilisation nutritive* propres : on désigne par là le rapport de la quantité utilisée réellement par le travail cellulaire à la quantité totale ingérée. Enfin les protéiques brûlent en fournissant presque exclusivement de l'urée, corps non dépourvu d'énergie, c'est-à-dire que leur combustion est *incomplete*...

Tout compte fait, il se trouve que le *pouvoir calorifique* des aliments est inférieur à leur chaleur de combustion, le premier étant déduit de mesures directes sur l'homme et les animaux.

Si l'on faisait abstraction du coefficient de digestibilité, si, en un mot, on se plaçait au point de vue d'un organisme brûlant ses réserves (cas de l'inanition), le pouvoir calorifique se confondrait avec la chaleur de combustion de ces mêmes réserves, vu qu'il n'y aurait point de déchet.

100. **Espèces alimentaires.** — 1° *Hydrates de carbone.* — Ce sont : cellulose, amidon, dextrine, sucres, glycogène, gommes et mucilages. Ils abondent dans les *féculents*, les *farineux* (pommes de terre, riz, etc.). On les consomme presque purs (miel, sirop) ou tout à fait purs (sucres).

Suivant la substance, le *coefficient de digestibilité* varie entre 0,90 et 1. L'expérience a donné comme pouvoir calorifique 4,10 Calories par gramme d'aliment (1).

2° *Graisses.* — Ce sont les huiles, beurres et corps gras animaux et végétaux. Une graisse est un composé représentant l'union d'un acide gras avec la glycérine. Ainsi la *stearine* est une combinaison d'acide stéarique et de glycérine.

Le coefficient de digestibilité des graisses est de 0,90 à 0,97; ainsi, celui de la graisse de *lard* est 0,967 d'après Katharine Blunt et Marg. Mallon (2).

Le pouvoir calorifique moyen s'élève à 9,10 Calories. A poids égal, les graisses sont les substances les plus exothermiques.

3° *Protéiques.* — Ces corps, de la nature de l'albumine ou blanc d'œuf, existent dans le lait (caséine), le fromage, surtout dans la viande, les haricots, pois, lentilles (légumine), etc. Ce sont des quaternaires à cause de la présence inévitable de l'azote. La matière vivante — le protoplasma — est essentiellement azoté.

Leur coefficient de digestibilité varie de 0,68 à 0,98 suivant l'aliment considéré; il est faible en ce qui concerne les aliments végétaux; sa valeur moyenne est de 0,91.

Quant au pouvoir calorifique moyen, il est sensiblement égal à celui des hydrates de carbone : 4,1 Calories.

(1) Les déterminations de pouvoirs calorifiques, qui ont conduit aux valeurs classiques que nous mentionnons, furent commencées par Rubner, en Allemagne (*Zeitsch. f. Biol.*, 1885, t. XXI, p. 250 et 377). Depuis 1886, le département de l'Agriculture de Washington, a publié, sous la direction d'Atwater et de ses collaborateurs, une série de recherches sur l'alimentation et le travail de l'homme. Ces publications ont pour titre : *Proceedings of the... american Agricultural Colleges and Experiment Stations*. Elles remplissent de nombreux bulletins numérotés et datés. Nous utiliserons souvent cette riche documentation, en citant le numéro du bulletin, la page et la date. Depuis la mort d'Atwater (1908), c'est Benedict qui dirige cette entreprise scientifique. La même Institution fait paraître aussi des « Publications » numérotées, distinctes des Bulletins.

(2) *Journ. of Biol. Chem.*, mai 1919, t. XXXVIII, p. 43.

Comparons, maintenant, les pouvoirs calorifiques, en combustion intraorganique, d'un gramme d'aliment — et les chaleurs de combustion, d'après Berthelot et André; on obtient les résultats suivants, comme *moyennes* de diverses combustions opérées sur substances variées (1) :

| Espèces alimentaires            | Pouvoir calorifique | Chaleur de combustion |
|---------------------------------|---------------------|-----------------------|
| 1 gramme d'hydrates de carbone. | 4Cal,10             | 4Cal,20               |
| 1 — de graisses . . . . .       | 9 ,10               | 9 ,40                 |
| 1 — de protéiques . . . . .     | 4 ,10               | 4 ,75                 |

Rubner (2) obtint comme pouvoirs calorifiques : 4Cal,10 ; 9Cal,30 et 4Cal,10 ; Atwater et Bryant trouvent (3) : 4Cal ; 8Cal,90 ; 4Cal.

D'autre part Atwater et ses collaborateurs ont déterminé la chaleur de combustion intraorganique de l'alimentation habituelle, mélange d'espèces alimentaires; ils ont évalué les chaleurs de combustion par gramme à 4Cal,10 ; 9Cal,40 et 4Cal,40 ; ces valeurs ont été vérifiées de nouveau par Kintaro Oshima (4), qui rectifie seulement le coefficient des hydrates de carbone, soient 4Cal,20 ; 9Cal,40, 4Cal,40. Toutes ces expériences démontrent que, dans l'organisme, la matière protéique, brûlée jusqu'au stade de l'urée, n'est pas aussi exothermique que la donnait Berthelot.

Malgré la diversité des coefficients calorifiques déterminés par des auteurs déjà très nombreux, et en tenant compte surtout des recherches d'Atwater, nous adopterons les valeurs moyennes suivantes :

|   | Hydrates de carbone | Graisses | Protéiques |
|---|---------------------|----------|------------|
| Chaleurs de combustion . . . . .  | 4Cal,15             | 9Cal,40  | 4Cal,40    |
| Pouvoirs calorifiques . . . . .   | 4 ,10               | 9 ,10    | 4 ,10      |
| Les coefficients de digestibilité de l'alimentation normale (5) seront respectivement . . . . . | 0 ,98               | 0 ,95    | 0 ,91      |

(1) On opère dans la bombe calorimétrique (voir § 36) et au moyen de l'oxygène sous une pression de 25 atmosphères (Berthelot et André, *Ann. Chimie et Physique*, 1891, t. XXII, p. 25).

(2) Rubner (*Zeitsch. f. Biol.*, t. XXI, p. 377; 1885; — t. XLII, p. 268; 1901).

(3) Atwater et Bryant (*Bull.*, n° 109, p. 86; 1899).

(4) Kintaro Oshima (*Bulletin*, n° 159, p. 223; 1905).

(5) Wait (*Bull.*, n° 89, p. 72; 1901; — n° 117, p. 41; 1902; — n° 136, p. 107; 1903).

101. **Séjour des aliments dans le tube digestif.** — Le travail des *sucs digestifs* nécessite un temps variable avec l'espèce alimentaire. Il est possible d'effectuer des sondages à travers l'intestin grêle et de déterminer la durée de séjour de chaque aliment.

Pawloff fit cette recherche sur le vivant, au moyen de canules mécaniques munies d'obturateurs. Best est arrivé, sur le chien, aux conclusions suivantes :

Le mode de préparation des viandes (cruës, rôties ou bouillies) ne modifie pas sensiblement leur digestibilité.

Il faut de trois à quatre heures en moyenne pour que 200 grammes de viande traversent l'estomac. Le bœuf bouilli séjourne le plus longtemps, le jambon le moins.

Les œufs crus sont plus digestibles que les durs. La digestion du pain est moins avancée que celle de la viande dans l'estomac.

Au contraire, la pomme de terre se digère facilement; elle active la sécrétion des sucs; ce que ne font ni le pain, ni les légumineux, qui arrivent dans l'intestin grêle n'ayant subi que de légères transformations<sup>(1)</sup>.

Mais il faut distinguer les hydrates de carbone, le sucre spécialement, à cause de leur absorption aisée; ils ne font qu'un bref séjour dans l'estomac et l'intestin, et ne provoquent pas de grandes sécrétions de sucs digestifs.

Le broyage mécanique, la bonne mastication<sup>(2)</sup>, la cuisson, l'assaisonnement des aliments activent les opérations digestives.

Le lait ordinaire sort de l'intestin grêle au bout d'une heure: le *lait écrémé* après une demi-heure seulement.

Une compote de pommes passe plus vite que la pomme crue et ménage les organes de digestion.

Nos propres expériences ont conduit à des résultats analogues<sup>(3)</sup>, montrant au surplus que l'activité respiratoire elle-même augmente dans le régime trop azoté: d'où un gaspillage d'énergie physiologique. Sur ces bases, on peut répartir rationnellement les heures de repas (voir § 194).

(1) Best (*Die Umschau*, 1911; n° 40).

(2) Ce qui condamne la détestable habitude de manger vite, appelée *Tachyphagie*.

(3) Jules Amar (*Journal de Physiologie*, 1912, p. 298).

L'*art culinaire* tient donc de la science; il est le collaborateur immédiat de l'hygiène alimentaire ou *Diététique*; il sert à favoriser la nutrition profonde de nos tissus sans charger l'appareil de la digestion.

102. **Siège de la combustion vitale.** — Où se produit la combustion, la réaction du combustible et du comburant? — L'aliment est absorbé par l'homme, élaboré, fixé dans les cellules où le sang le véhicule: c'est l'*assimilation*; et il se fixe principalement dans les organes moteurs: les muscles. C'est donc dans toutes les cellules où le sang l'a déposé, où il constitue une réserve, que l'aliment subit la combustion, car, en même temps, le sang y apporte l'*oxygène*. La combustion vitale est *intracellulaire*, et bien que les moteurs musculaires en soient le siège actif, elle est générale à tout l'organisme. Nous rappelant, d'ailleurs, que la dépense d'énergie s'effectue même à l'*état de complet repos*, comme conséquence de la vie, nous comprendrons que l'alimentation soit, chez les êtres vivants, une chose générale, et en plus, chez les animaux, une chose particulière: la source de leur *travail*. La combustion et l'utilisation des aliments, ou la *désassimilation*, s'effectue ainsi au foyer cellulaire. De quelle manière l'oxygène, charrié par les *globules rouges* du sang, réagit-il sur la molécule alimentaire élaborée au sein de la cellule? Cette question si passionnante n'a pas reçu de réponse, mais on se figure volontiers un état *condensé* des molécules d'oxygène et un état *stéréochimique* (§ 21) des molécules combustibles qui augmentent leur *force chimique*, ou, si l'on veut, leur *affinité* (§ 37); la matière des globules rouges, appelée *hemoglobine*, abandonne facilement son oxygène qu'elle ne retenait que par des chaînes fragiles, et cette *dissociation* donnerait un *oxygène naissant* plus actif que le gaz normal.

Les recherches modernes ont appris en outre que la partie active de la cellule, c'est son *noyau*. Il est le centre du métabolisme, la source des énergies nutritives et vitales.

Le noyau est gros et abondant dans les cellules jeunes, présidant ainsi à leur croissance et aux opérations de la vie. La *vieillesse* et le *surmenage* le diminuent.

## CHAPITRE III

### L'ALIMENTATION ET LA DÉPENSE

**103. Rations alimentaires.** — On donne le nom de *ration alimentaire* à un poids déterminé d'aliments. Cette ration peut être *pure* ou *mixte*, suivant qu'elle comprend une ou plusieurs espèces alimentaires. Son pouvoir calorifique résulte de sa composition *immédiate* (§ 99); ainsi une ration de 100 grammes de pain et 100 grammes de haricots (secs) donne :

|                        |                             |  |
|------------------------|-----------------------------|--|
| { Hydrates de carb.    | 107 <sup>gr</sup> ,26, soit | 439 <sup>Cal</sup> ,77 (= 107,26 × 4,10) |
| { Graisses . . . . .   | 1 ,60, soit                 | 14 ,36 (= 1,60 × 9,10)                   |
| { Protéiques . . . . . | 28 ,23, soit                | 115 ,75 (= 28,23 × 4,10)                 |

Pouvoir calorifique de la ration. 570<sup>Cal</sup>,08

En vue de faciliter le calcul des valeurs énergétiques des différentes rations, on a publié de véritables encyclopédies donnant la composition immédiate des aliments. Les tableaux suivants sont tirés de l'ouvrage de Balland <sup>(1)</sup> et complétés par nous; ils concernent l'alimentation française surtout, comme ceux de Kœnig <sup>(2)</sup> se rapportent aux produits allemands. Il est superflu de dire que ces tableaux sont extrêmement pratiques.

(1) A. Balland, *les Aliments*, 2 vol., chez Baillière, Paris, 1907.

(2) J. Kœnig, *Chemie der Menschlichen Nahrungs und Genussmitteln*, Berlin, I, 1903; II, 1904; III, 1910-13 (4<sup>e</sup> édit.).

Des tableaux de Kœnig sont traduits par Siedersky dans la *Revue de la Société scientifique d'hygiène alimentaire*, t. II, p. 93-113; 1906.

TABLEAU DES ALIMENTS USUELS (1).

| 100 GRAMMES D'ALIMENTS          | HYDRATES<br>DE CARBONE | GRAISSES | PROTÉIQUES | POUVOIR<br>CALORIFIQUE |        |
|---------------------------------|------------------------|----------|------------|------------------------|--------|
|                                 | grammes                | grammes  | grammes    | Calories               |        |
| Abricots frais.....             | 8,10                   | 0,12     | 0,48       | 36,06                  |        |
| Amandes seches.....             | 18,00                  | 54,20    | 18,10      | 641,23                 |        |
| Artichauts de Paris (fond)..... | 13,07                  | 0,21     | 3,68       | 70,00                  |        |
| Asperges.....                   | 4,72                   | 0,41     | 3,38       | 36,94                  |        |
| Bananes de Paris.....           | 21,90                  | 0,09     | 1,44       | 96,51                  |        |
| Beurre d'Isigny.....            | 0,00                   | 83,58    | 2,52       | 770,91                 |        |
| Bœuf.....                       | Cœur.....              | 2,20     | 4,84       | 15,25                  | 115,59 |
|                                 | Rognons.....           | 2,54     | 1,82       | 16,30                  | 93,81  |
|                                 | Graisse.....           | 0,00     | 90,94      | 0,76                   | 830,67 |
| Cacao du Congo.....             | 30,25                  | 42,40    | 11,35      | 556,40                 |        |
| Cacao de New-York (*).....      | 37,70                  | 28,90    | 21,60      | 506,12                 |        |
| Carottes.....                   | 9,50                   | 0,19     | 1,19       | 45,56                  |        |
| Carpe.....                      | 0,52                   | 3,56     | 15,34      | 97,42                  |        |
| Cerises... {                    | douces.....            | 14,12    | 0,09       | 1,02                   | 62,89  |
|                                 | acides.....            | 11,97    | 0,40       | 1,26                   | 57,88  |
| Champignons de couche..         | 3,68                   | 0,32     | 4,50       | 36,45                  |        |
| Châtaigne (b).....              | 33,16                  | 0,89     | 2,47       | 154,18                 |        |
| Cheval (filet de).....          | 1,44                   | 2,95     | 21,95      | 122,74                 |        |
| Chicorée (scarole).....         | 4,02                   | 0,10     | 1,04       | 21,65                  |        |
| Chocolat {                      | ordinaire.....         | 62,65    | 25,50      | 8,35                   | 523,10 |
|                                 | Menier (c).....        | 68,90    | 21,00      | 8,75                   | 514,83 |
| Chou-fleur (fleurs).....        | 4,89                   | 0,38     | 3,51       | 37,90                  |        |
| Choux de Bruxelles.....         | 9,62                   | 0,58     | 3,80       | 60,30                  |        |
| Couscous (d).....               | 85,40                  | 2,07     | 9,80       | 409,16                 |        |
| Crème de Saint-Julien...        | 1,60                   | 26,52    | 2,58       | 258,47                 |        |
| Crevette (chair) (e).....       | 0,18                   | 1,00     | 27,60      | 123,00                 |        |
| Dattes.....                     | 67,10                  | 0,06     | 1,96       | 283,69                 |        |
| Doura (Sorgho d'Afrique).....   | 52,50                  | 0,44     | 8,33       | 253,40                 |        |

(\*) D'après Atwater et Woods (*Bulletin*, n° 28, p. 41; 1896).

(b) Il s'agit des châtaignes du Limousin, qui sont les plus abondantes; la châtaigne est un aliment important dans plusieurs départements (Centre et Midi); la France en produit 4 millions de quintaux environ.

(c) Le chocolat renferme du cacao, qui lui fournit un principe alcaloïdique, excitant neuro-musculaire, la *cafféine* (voir § 108); il y a 0,16 0/0 de caféine dans le cacao, et 1gr,40 par 100 grammes de chocolat Menier, d'après nos renseignements personnels. Le chocolat *américain* est très riche en graisses; voici sa composition: hydrates de carbone, 26,80; graisses, 47,10; protéiques, 12,50. C'est un pouvoir calorifique de 589C<sup>al</sup>,74 (Atwater et Woods, *Bulletin* n° 28, p. 41). Mais le pouvoir calorifique ne renseigne pas sur la *qualité* d'un aliment.

(d) Jules Amar, *Le Rendement de la machine humaine*, p. 50-51. Il s'agit de matières desséchées, mais il y a une humidité moyenne, à l'état frais, de 58 0/0, et une acidité de 7<sup>m</sup>3,50 0/0 (état sec) en acide sulfurique normal.

(e) Il s'agit de crevettes américaines (*Bulletin* n° 538 de Washington, 27 juin 1917).

(1) Sauf indication spéciale, ce sont des aliments frais, achetés à Paris.

TABLEAU DES ALIMENTS USUELS (suite).

| 100 GRAMMES D'ALIMENTS     | HYDRATES<br>DE CARBONE | GRAISSES | PROTÉIQUES | POUVOIR<br>CALORIFIQUE |        |
|----------------------------|------------------------|----------|------------|------------------------|--------|
|                            | grammes                | grammes  | grammes    | Calories               |        |
| Épinards .....             | 5,58                   | 0,33     | 4,06       | 42,53                  |        |
| Fèves décortiquées sèches. | 54,41                  | 1,35     | 27,32      | 347,38                 |        |
| Figues sèches .....        | 53,67                  | 2,10     | 2,26       | 248,42                 |        |
| Foie de veau .....         | 1,83                   | 7,13     | 19,12      | 150,78                 |        |
| Fraises des bois .....     | 8,85                   | 0,99     | 1,36       | 50,87                  |        |
| Fromages                   | { brie .....           | 4,85     | 22,45      | 19,94                  | 305,93 |
|                            | { camembert ..         | 5,95     | 21,65      | 18,72                  | 298,16 |
|                            | { gruyère .....        | 1,79     | 26,95      | 36,06                  | 400,43 |
|                            | { Roquefort ..         | 3,00     | 38,30      | 25,16                  | 464,00 |
| Harengs                    | { frais .....          | 0,46     | 4,80       | 17,23                  | 116,21 |
|                            | { fumés .....          | 0,71     | 14,97      | 51,62                  | 350,74 |
| Haricots                   | { verts .....          | 4,17     | 0,28       | 1,99                   | 27,86  |
|                            | { secs (Soissons)      | 53,68    | 1,44       | 20,18                  | 315,93 |
| Huitres .....              | 7,33                   | 1,43     | 8,70       | 78,74                  |        |
| Jambon (pâte de) .....     | 0,73                   | 33,83    | 18,60      | 387,10                 |        |
| Lait de vache .....        | 4,83                   | 4,12     | 3,23       | 70,54                  |        |
| Laitue (romaine) .....     | 1,74                   | 0,15     | 0,92       | 12,27                  |        |
| Lapin                      | { cuisse .....         | 0,47     | 3,14       | 23,49                  | 126,81 |
|                            | { filet .....          | 1,90     | 1,97       | 18,66                  | 102,22 |
| Lentilles sèches .....     | 56,07                  | 1,45     | 23,04      | 337,55                 |        |
| Lièvre (cuisse) .....      | 2,55                   | 3,34     | 29,88      | 163,36                 |        |
| Macaroni .....             | 75,70                  | 0,65     | 10,89      | 361,02                 |        |
| Maquereau .....            | 0,28                   | 15,04    | 15,67      | 202,26                 |        |
| Marrons .....              | 32,17                  | 1,08     | 3,15       | 154,64                 |        |
| Melon (cantaloup) .....    | 3,72                   | 0,11     | 0,60       | 18,71                  |        |
| Merlan .....               | 1,25                   | 0,46     | 16,15      | 75,53                  |        |
| Mouton (gigot) .....       | 2,36                   | 6,53     | 17,86      | 142,32                 |        |
| Navet .....                | 5,57                   | 0,06     | 0,47       | 25,31                  |        |
| Noisettes sèches .....     | 13,22                  | 61,16    | 15,58      | 674,64                 |        |
| Noix .....                 | 17,57                  | 41,98    | 11,05      | 499,36                 |        |
| Nouilles .....             | 75,21                  | 0,60     | 11,58      | 361,30                 |        |
| Œuf de poule .....         | 1,43                   | 11,04    | 11,59      | 153,85                 |        |
| Oie grasse .....           | 0,58                   | 18,85    | 14,24      | 232,30                 |        |
| Oseille .....              | 3,57                   | 0,40     | 2,74       | 29,51                  |        |
| Pain                       | { en flûte .....       | 61,59    | 0,24       | 5,99                   | 279,26 |
|                            | { de ferme (a) ..      | 58,04    | 0,40       | 7,25                   | 271,33 |
|                            | { de munitions (b) ..  | 53,58    | 0,10       | 8,05                   | 254,14 |
|                            | { viennois .....       | 57,29    | 0,11       | 7,03                   | 264,71 |
| Pêches .....               | 10,36                  | 0,48     | 0,86       | 50,37                  |        |
| Poires .....               | 9,93                   | 0,04     | 0,24       | 42,06                  |        |
| Pois                       | { frais .....          | 14,02    | 0,24       | 4,47                   | 78,00  |
|                            | { secs .....           | 57,76    | 1,40       | 20,56                  | 335,85 |

(a) Vieux de cinq jours.

(b) A. Balland (*Revue de l'Intendance*, 1907, p. 631).

TABLEAU DES ALIMENTS USUELS (suite).

| 100 GRAMMES D'ALIMENTS      | HYDRATES<br>DE CARBONE | GRAISSES | PROTÉIQUES | POUVOIR<br>CALORIFIQUE |        |
|-----------------------------|------------------------|----------|------------|------------------------|--------|
|                             | grammes                | grammes  | grammes    | Calories               |        |
| Pommes (fruits).....        | 14,41                  | 0,06     | 1,44       | 65,53                  |        |
| Pomme de terre ordinaire.   | 17,58                  | 0,04     | 1,71       | 79,45                  |        |
| Porc (cuisse).....          | 1,58                   | 3,40     | 20,30      | 117,92                 |        |
| Poulet (cuisse).....        | 1,46                   | 10,95    | 17,49      | 174,58                 |        |
| Pruneaux (pulpe).....       | 71,44                  | 0,40     | 2,37       | 306,26                 |        |
| Raie.....                   | 0,47                   | 0,45     | 22,08      | 95,32                  |        |
| Raisins { frais (chasselas) | 17,69                  | 0,38     | 0,49       | 78,00                  |        |
| { secs.....                 | 76,70                  | 0,56     | 0,45       | 313,41                 |        |
| Riz blanc.....              | 75,22                  | 0,30     | 8,89       | 347,58                 |        |
| Rouget.....                 | 2,29                   | 0,98     | 22,85      | 112,00                 |        |
| Sardines fraîches.....      | 0,57                   | 2,33     | 22,12      | 114,23                 |        |
| Saumon.....                 | 0,08                   | 20,00    | 17,65      | 254,69                 |        |
| Soja (graine) (*).....      | 29,00                  | 17,00    | 33,00      | 408,90                 |        |
| Sole.....                   | 1,11                   | 0,81     | 17,26      | 82,69                  |        |
| Tomate rouge.....           | 2,92                   | 0,10     | 0,89       | 16,53                  |        |
| Tripes de Caen.....         | 4,73                   | 16,79    | 19,06      | 250,33                 |        |
| Veau {                      | carre.....             | 0,92     | 2,28       | 20,40                  | 108,16 |
|                             | cervelle échaudée.     | 0,12     | 16,33      | 13,26                  | 203,46 |
|                             | Epaule.....            | 1,22     | 4,08       | 22,27                  | 133,43 |

(\*) Analyse de Trabut (*Bull. Bot. d'Algérie*, 1918, n° 55). Amy et Nell ont trouvé moins d'hydrates de carbone (*Bull. Inst. intern. d'Agric.*, janvier 1918).

104. Rations d'entretien. — En accroissant ou diminuant convenablement la quantité d'aliments qu'un sujet absorbe dans les vingt-quatre heures, on arrive à la ration qui assure son *équilibre de poids* : le corps ne subit ni perte ni gain dans sa masse. « J'admets, écrivait Boussingault en 1844, qu'un animal adulte soumis à la *ration d'entretien* rend, dans les différents produits résultant de l'action vitale, une quantité de matière précisément égale et semblable à celle qu'il perçoit par les aliments (1). » De là l'invariabilité de poids constatée. Tout ce que la combustion intraorganique a fait perdre aux réserves, l'alimentation vient le combler.

Si l'alimentation est surabondante, il y aura formation d'autres réserves, et plus riches : le sujet gagnera en poids.

Si, au contraire, elle est insuffisante, ce sont les réserves anciennes qui combleront le déficit : le sujet baissera de

(1) Boussingault, *Economie rurale*, vol. II, p. 351; 1844.

poids. De toutes façons la *dépense* de l'organisme a une source à peu près constante; sa valeur ne se modifie pas au gré du flux alimentaire. Nous verrons qu'elle se règle, surtout, d'après le flux énergétique.

Dans la pratique, la connaissance d'une ration d'entretien s'acquiert assez facilement: si le sujet a une vie régulière, on n'a pas à tâtonner longtemps pour fixer sa ration d'entretien; en deux ou trois jours elle est trouvée. Mais, en général, il faut compter quatre à cinq jours (voir *Technique*, § 247).

Il tombe sous le sens que la ration d'entretien n'est pas la même pour tous les sujets; car elle doit dépendre de la masse totale du corps, laquelle varie suivant l'âge et le sexe; elle dépend surtout du milieu extérieur et de l'état de repos ou d'activité.

1° *Masse du corps*. — L'entretien d'une masse organique croissante exige une dépense alimentaire également croissante (4). Il faut, avant tout, réparer l'*usure des tissus*, conséquence inévitable de la vie; or cette usure ne peut se réparer qu'avec de la matière azotée, des protéiques. En effet, il se produit constamment une élimination d'azotés par l'urine, (urée, acide urique), par la desquamation épithéliale (2) (14 à 15 grammes par jour), par le travail digestif. Aussi, dans toute ration alimentaire, un *minimum de protéiques* est-il indispensable pour réparer l'usure des tissus; on peut le fixer à 1 gramme par kilogramme de poids de l'homme, en vingt-quatre heures, soit à 65 ou 70 grammes pour un adulte. Pourvu que la ration soit suffisante (3), ce minimum n'a pas besoin d'être dépassé; il devient une *constante de la masse du corps*, indépendante de l'activité du sujet (4) et du milieu extérieur.

La question du minimum de protéiques a donné lieu à de très nombreuses études pendant trente-cinq années environ. Les recherches de Eijkmann (5), par leurs résultats concordants, et le

(1) L'enfant se trouve dans ce cas; sa ration doit donc être surabondante (voir § 85).

(2) Moleschott (*Moleschott's Untersuch.*, t. XII, p. 175; 1879).

(3) Atwater et Benedict (*Bull.* n° 136, p. 421-426; 1903).

(4) Wait (*Bull.*, n° 89, p. 70; n° 117, p. 40); Atwater et Benedict (*Bull.*, n° 136, p. 175).

(5) Eijkmann (*Wirchow's Arch.*, t. CXXXI et CXXXIII; 1893).

régime alimentaire mixte qui a été suivi, méritent de retenir l'attention; elles conduisent à 1<sup>er</sup>,20 par kilogramme en moyenne. R.-H. Chittenden (1) reconnut sur des étudiants, gymnastes, soldats, que 0<sup>er</sup>,75 est une valeur qui permet « de conserver le même degré de santé et vigueur, et en plus de réaliser une augmentation sensible du pouvoir musculaire »; pendant plusieurs mois, aucune perte ne fut constatée dans le poids de ces personnes.

Quand l'alimentation est végétale, le taux de 0<sup>er</sup>,70 paraît suffisant (2), sans que l'on puisse dire, cependant, que l'alimentation animale nécessite un taux plus élevé. Dans la pratique, on consomme plus de protéiques qu'il n'en faut et l'on n'en retire aucun avantage appréciable; tout au contraire.

Pris dans leur ensemble, les aliments consommés augmentent de quantité depuis les grandes jusqu'aux petites tailles, si l'on rapporte la consommation au kilogramme de poids du corps (3). Mais toute ration d'entretien devra contenir, environ, 1 gramme de protéiques par kilogramme de poids du sujet.

2° *Milieu extérieur et activité motrice.* — L'homme, ainsi que les animaux *homeothermes*, doivent régler leur température, à tout instant, pour qu'elle demeure sensiblement constante. Cela est nécessaire probablement à la *vitesse* des réactions intraorganiques, vitesse que les fonctions motrices exigent très grande, et que la température favorise. Or, une température invariable a pour condition un régime calorifique *stationnaire* (§ 62), l'organisme produisant autant de chaleur qu'il en perd à tout instant. Mais si le *milieu extérieur* se refroidit graduellement, la perte sera croissante, car le corps *rayonnera de plus en plus* (loi de Newton, § 173); il faudra donc une dépense compensatrice graduellement croissante. Tout le monde sait que la *ration d'hiver* est plus abondante que la *ration d'été*.

D'autre part, normalement et au repos, les organes *végétatifs*, de digestion, respiration, circulation, sont en activité; ils font un *travail intérieur*, et dissipent en frottements,

(1) R. Chittenden, *Physiol. Economy in nutrition, with special reference to the minimal proteid requirement of the healing man. An experimental study.* London, 1905.

(2) L. Lapique (*Arch. de physiol.*, 1894, p. 596); H. Tissier (*Comptes Rendus Biologie*, 1910, p. 12).

(3) Magnus Levy (*Pflüg. Arch.*, t. LV; 1893, p. 1).

en *chaleur*, une certaine quantité d'énergie à laquelle il faut faire correspondre un *minimum d'hydrates de carbone*, comme on le verra plus loin.

L'organisme est « toujours en état » et en équilibre thermique par sa dépense d'ensemble, relative au milieu extérieur et au milieu intérieur, par la *Dépense statique* en un mot.

Que les muscles viennent à *travailler*, à se *contracter*, et il faudra, pour faire face à cette *activité externe*, une nouvelle dépense : la *Dépense dynamique*. La ration alimentaire suffit à tout.

105. **Les Vitamines.** — Mais, quelle que soit sa composition, la ration doit contenir certains principes, sous peine de troubler l'ordre physiologique.

On sait déjà qu'il y faut un *taux minimum de substances azotées*. Est-ce tout ?

Voici ce que l'expérience a révélé à ce sujet :

Les albuminoïdes étant, par leur principe azoté, les éléments de la *croissance*, il importe de savoir de quels facteurs cette dernière dépend, et si tous les azotés les contiennent.

L'analyse chimico-physiologique a pu démontrer que la molécule albuminoïde est, sous l'action des sucs digestifs, désarticulée, réduite en pierres comme un édifice qui tombe en ruines. Et ces pierres de construction sont les *acides aminés* : *acide glutaminique* (du froment), *zéine* (du maïs), *lysine*, *hordenine*, etc. (1). Ce sont elles que les cellules de l'organisme emploient à former des tissus vivants.

Les acides aminés sont contenus en abondance dans le lait (par la caséine), les œufs, la viande, et divers végétaux (légumineuses), surtout quand on les consomme frais. On s'est assuré, d'autre part, que leur présence favorise l'accroissement du corps et garantit l'équilibre physiologique.

Ces recherches, que nous résumons pour éviter des longueurs inutiles à notre dessein, datent déjà de 1900. Elles ont repris une importance considérable à propos de cer-

(1) E. Abderhalden, *Lehrbuch der physiol. Chemie*, 1914 (3<sup>e</sup> edit.) ; — Geiling (*Journ. Biol. Chem.*, t. XXXI, juillet 1917).

taines maladies où, à bon droit, on avait suspecté la *qualité chimique* des aliments.

Par exemple, une matière azotée que l'on porte au delà de 120°, les céréales décortiquées, les viandes stérilisées, le lait et les œufs trop cuits, produisent des désordres graves dans l'organisme.

On leur a attribué le *scorbut*, le *beribéri*, la *pellagre*, le *rachitisme* et des accidents paralytiques.

Ces principes, que la chaleur détruit et qu'exige la vie normale, ce sont les *Vitamines*. Funk, en 1909, réussit à les isoler de la *cuticule (son)* du riz, de l'orge, du blé. Et en 1911, il put préparer une *vitamine anti-beribérique*.

De là le nom d'*Avitaminoses* ou maladies par *carence*, par *deficience*, données à ces désordres organiques dus à l'absence de vitamines (1).

La proportion qu'elles représentent dans les substances alimentaires est infime.

De 100 kilogrammes de son, on a seulement extrait 2<sup>gr</sup>,50 de vitamines ; c'est le « radium » de la matière azotée.

Quant à sa réalité, à la nature du principe vitaminique, ce n'est point le lieu de la discuter. Est-ce un principe vital, associé symbiotiquement à nos cellules, ou, suivant la désignation de Portier, un « symbiote » ?

Est-ce, au contraire, des éléments propres de la cellule, comme l'a prétendu Lumière ?

La question est encore sans réponse (2).

Mais il n'est aucunement douteux que la qualité chimique de l'aliment peut s'altérer sous diverses influences, notamment la température, au point de compromettre gravement la marche des opérations cellulaires.

Ce qu'il importe de retenir, c'est qu'un grand nombre de nos aliments offrent en suffisance ces vitamines mystérieuses.

Il y en a dans tous les légumes frais, les fruits, surtout ceux qui sont acides, les citrons, les oranges, ces derniers à

(1) C. Funk, *Die Vitamine und Avitaminosen* ; Wiesbaden, 1914.

(2) Lire, si l'on veut suivre ces discussions : P. Portier, *Les Symbiotes* ; Paris, 1918 ; — A. Lumière, *Le mythe des Symbiotes*, Paris, 1919 ; et *Bull. Acad. méd.*, 27 janvier et 30 novembre 1920.

raison de principes actifs autres que l'acide citrique (1). On a recommandé, parmi les légumes, les épinards et les choux (2), et Mc Collum insiste sur les avantages, pour les nourrissons, du *lait maternel* (3), de préférence au lait pasteurisé ou cuit.

La stérilisation (4), ou le *blutage* exagéré, au delà de 85 0/0, enlèvent toute trace de vitamine, et rendent le pain impropre à la nutrition. A cet égard le pain *bis* est plus sain que le *blanc*; il s'impose aux voyageurs qui se nourrissent de conserves, aux soldats et aux marins ainsi qu'aux pauvres. L'avantage du son mêlé à la farine est incontestable (5), et la farine non blutée s'est montrée au moins aussi nourrissante que l'autre sans compter son intérêt économique (6). Mais il est bon de réduire le son en particules très ténues (7).

La conclusion de ce rapide exposé, c'est qu'une ration alimentaire, pour être physiologiquement rationnelle, doit être proportionnée en ses principes gras, azotés et sucrés, et en outre contenir un excès de légumes et de fruits frais.

L'état naturel de l'aliment est assurément le plus sain qui se puisse concevoir comparé aux préparations trop cuites, ou traitées chimiquement.

Mc Collum, qui a longuement étudié l'action vitaminique du *beurre et du lait* (*loc. cit.*), estime qu'elle favorise au maximum la croissance physique, principalement la taille, et qu'elle prolonge la durée de la vie. Le rôle du beurre dans la restauration de l'équilibre pondéral du corps est reconnu en toute certitude; nous l'avions affirmé déjà en 1909 à la suite de recherches délicates effectuées sur l'homme (voir § 164).

(1) Harden et Zilva (*Bull. agric. Institut de Rome*, décembre 1919).

(2) B. Osborne et B. Mendel (*Journ. Biol. Chem.*, 1919, t. XXXVII, p. 487).

(3) Mc Collum, *The newer knowledge of nutrition* (New-York, 1919).

(4) Elle gêne la croissance et la résistance organique, et donne le scorbut (Cohendy et Wollman : *C. R. Ac. Sc.*, 17 avril 1922).

(5) Skand, *Arch. f. Physiol.*, 1913, t. XXVIII, p. 165 (expériences de Hindhede, de Copenhague).

(6) Eykmann (*Arch. néerl. de Physiol.*, avril 1917, I, p. 766).

(7) Langworthy et Devel (*Proceed. Nat. Ac., U. S. A.*, nov. 1919).

Concluons donc que les vitamines sont des substances mal définies, en traces infimes dans les corps albuminoïdes, et qu'elles semblent, d'après nous, stimuler la nutrition par leurs effets sur le *système nerveux*. On n'a point trouvé que la croissance des plantes ait besoin de vitamines.

**106. Méthodes d'évaluation des rations.** — Pour un sujet et dans des conditions déterminées, on évalue la ration par deux procédés :

1° *Méthode de l'équilibre nutritif.* — Il en a été déjà question plus haut (§ 104) : on alimente le sujet, l'homme, au moyen d'une ration ayant une *composition* à peu près constante ; puis, diminuant convenablement la *quantité* d'aliments, on réalise celle qui assurera l'*invariabilité* de poids du corps. Le pouvoir calorifique d'une telle ration exprime la dépense énergétique des vingt-quatre heures. Mais, d'après ce que nous avons dit, il importe beaucoup que le milieu extérieur ne subisse pas de fortes oscillations de température, et surtout que le sujet soit au repos s'il s'agit de connaître sa *dépense statique*, — ou qu'il effectue un travail toujours identique, si l'on veut connaître sa *dépense dynamique*.

Pour ces raisons, la méthode de l'équilibre nutritif ne peut être employée, dans des évaluations précises, qu'avec de grandes précautions. Elle est, au contraire, pratique si l'on se contente d'approximations.

2° *Méthode de l'oxygène.* — La méthode précédente revenait à déterminer la quantité et la qualité du *combustible*. Mais on peut se proposer de connaître la quantité de *combustible*, c'est-à-dire le volume d'oxygène utilisé par l'organisme. Cela est très simple : en faisant passer les gaz expirés des poumons à travers un *spiromètre* (compteur), on aura le volume d'air traversant l'organisme en une période de temps, une heure par exemple. L'analyse de ces gaz indiquera leur teneur en oxygène ; et comme l'air du dehors en contient normalement 21 0/0, *en volume*, la différence exprimera l'appauvrissement de l'air dans son passage à travers l'organisme. On déduira le volume total d'oxygène consommé de la lecture du spiromètre.

Une disposition commode <sup>(1)</sup> consiste à respirer par la bouche au moyen de la soupape de Chauveau (fig. 131) : l'air

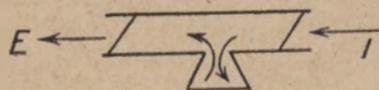


FIG. 131. — Soupape Chauveau.

est inspiré par I et expiré par E, d'où il se rendra dans un petit récipient avant de sortir par le compteur. Sur ce petit récipient on pratique un échantillonnage aussi

faible qu'on voudra pour l'analyser après l'expérience (voir *Technique*, § 252, et fig. 132). Un homme adulte con-



FIG. 132. — Mesure des échanges gazeux d'un homme chargé (dispositif de l'auteur).

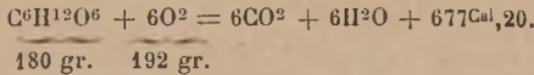
somme, au repos, environ 20 litres d'oxygène mesurés à 0° et à la pression normale de 760 millimètres. La dépense d'oxygène augmente beaucoup par le travail.

Reste à savoir à quelle *quantité d'énergie* réellement utilisée correspond un volume d'oxygène absorbé. L'énergie mise en jeu est, sans doute, proportionnelle à la masse de cet oxygène, et dépend de la nature du combustible : graisses,

(1) Jules Amar (*Journal de Physiologie*, mars 1911, p. 212).

hydrates de carbone ou protéiques, ou enfin leur mélange (*rations mixtes*). L'expérience a permis d'adopter, dans le cas de l'alimentation mixte, une valeur de  $4^{\text{Cal}},90$  pour l'énergie développée lors de la consommation d'un litre d'oxygène, à  $0^{\circ}$  et 760 millimètres.

107. La méthode de l'oxygène demande un examen plus approfondi. En effet, la combustion intra-organique peut porter, suivant les circonstances, sur des molécules de l'une des trois espèces alimentaires. Soit, par exemple, une molécule de *glucose*; elle a pour formule  $\text{C}^6\text{H}^{12}\text{O}^6$  et pour poids moléculaire 180 grammes (§ 21); elle brûle en donnant du gaz carbonique et de l'eau, et en dégageant de la chaleur. Or l'équation de combustion est :



On déduit de cette équation :

1° Que 6 volumes d'oxygène donnent 6 volumes de gaz carbonique; en fait, le carbone seul a brûlé; le rapport  $\frac{\text{CO}^2}{\text{O}^2} = 1$  en volume. On a donné à ce rapport le nom de *quotient respiratoire*. Si donc le sujet s'alimentait de sucres, son quotient respiratoire serait égal à l'unité;

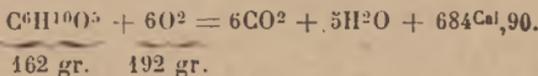
2° Qu'un gramme de glucose met en liberté  $\frac{677,20}{180} = 3^{\text{Cal}},762$ ;

3° Qu'un gramme d'oxygène, correspondant à  $0^1,699$  (mesuré à  $0^{\circ}$  et 760) <sup>(1)</sup>, met en liberté :  $\frac{677^{\text{Cal}},20}{192} = 3^{\text{Cal}},527$ , ce qui fait  $5^{\text{Cal}},04$  par litre d'oxygène;

4° Enfin que, pour brûler, 1 gramme de glucose exige  $\frac{192}{180}$  grammes d'oxygène, soit environ :

$$\frac{192}{180 \times 1,429} = 0^1,746 \text{ d'oxygène.}$$

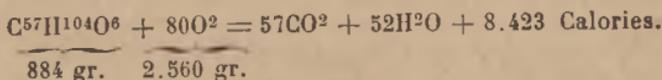
Considérons un autre hydrate de carbone, toujours présent dans les muscles, et dont la source continue est le foie (voir § 114) : le *glycogène*  $\text{C}^6\text{H}^{10}\text{O}^5$ ; son equation de combustion est :



(1) Le litre d'oxygène, à  $0^{\circ}$  et 760 millimètres, pèse environ  $1^{\text{gr}},429$ , ce qui donne  $0^1,699$  par gramme.

Elle conduit à  $3^{\text{Cal}},56$  par gramme d'oxygène ou  $5^{\text{Cal}},08$  par litre, et, d'autre part, à  $4^{\text{Cal}},22$  par gramme de glycogène comburé. Le quotient respiratoire est encore 1, comme pour tous les hydrates de carbone (1).

Passons à l'équation de combustion d'une graisse, la *trioléine*,  $\text{C}^{57}\text{H}^{104}\text{O}^6$ . On a :

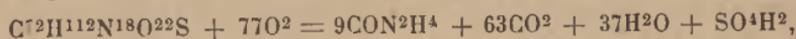


Ici, le quotient respiratoire est  $\frac{57}{80} = 0,712$ , bien inférieur à l'unité, et l'énergie calorifique est de  $\frac{8.423}{884} = 9^{\text{Cal}},52$  par gramme de matière, ou :

$$\frac{8.423}{2.560} \times 1,429 = 4^{\text{Cal}},70.$$

par litre d'oxygène, mesure à 0° et 760 millimètres.

Si, enfin, nous nous adressons aux protéiques, dont le type chimique est l'*albumine* de Lieberkühn  $\text{C}^{72}\text{H}^{112}\text{N}^{18}\text{O}^{22}\text{S}$ , nous aurons :



et il se développera  $5^{\text{Cal}},691$  par gramme d'albumine, dont il faut déduire  $0^{\text{Cal}},845$  disponible dans l'urée formée, soit une production énergétique de  $4^{\text{Cal}},846$  par gramme de substance, et  $4^{\text{Cal}},53$  par litre d'oxygène consommé. Le quotient respiratoire sera :

$$\frac{\text{CO}^2}{\text{O}^2} = \frac{63}{77} = 0,818.$$

Toutes ces valeurs théoriques — la seule chaleur de combustion étant d'ordre expérimental — conduisent au tableau suivant :

|  | Hydrates<br>de carbone | Graisses            | Protéiques          |
|--|------------------------|---------------------|---------------------|
| Pouvoir calorifique du litre d'oxygène à 0° et 760 millimètres.... | $5^{\text{Cal}},05$    | $4^{\text{Cal}},70$ | $4^{\text{Cal}},53$ |
| Quotient respiratoire $\text{CO}^2/\text{O}^2$ .....               | 1 ,00                  | 0 ,71               | 0 ,82               |

En réalité, nous ne savons pas sous quel état moléculaire l'albumine est oxydée, à quels stades précis la combustion s'arrête. Les

(1) Le glycogène est élaboré dans le foie que traverse, avant de se rendre au torrent circulatoire, le liquide (*chyle*) extrait des aliments par la paroi digestive ; les vaisseaux chylifères proprement dits vont directement à ce torrent, mais la *veine porte*, qui a des embranchements autour de l'intestin, véhicule les sels, sucres et albumines solubles vers l'entrepôt du foie, en attendant leur utilisation définitive.

vérifications ont été nombreuses, toutefois, pour démontrer que l'alimentation hydrocarbonée élève le quotient respiratoire jusqu'au voisinage de l'unité; que l'alimentation grasse l'abaisse à 0,73 en moyenne, et qu'il a bien une valeur de 0,82 à 0,83 dans une alimentation protéique<sup>(1)</sup>. Ce dernier cas doit entraîner, pour la même dépense d'énergie, une *consommation supérieure d'oxygène*<sup>(2)</sup>, puisque les protéiques sont les moins « thermogénétiques ». L'expérience a montré qu'il en est réellement ainsi, et que l'oxygène de la combustion est absorbé en quantité croissante depuis les hydrates de carbone jusqu'aux graisses et aux protéiques; le gaspillage caractérise ces derniers. Tout cela démontre la sensibilité de la méthode de l'oxygène; et l'École américaine ne pouvait mieux vérifier que la dépense énergétique trouve la « sa plus fidèle représentation »<sup>(3)</sup>.

D'autant plus qu'elle l'emporte en sécurité sur une méthode utilisant le *gaz carbonique* exhalé. Car ce dernier ne provient pas exclusivement de la combustion; il ne traduit pas le résultat unique de l'oxydation. Il peut avoir d'autres origines: phénomènes de fermentation, de dissociation lente, etc. Erreurs évidemment légères, mais qu'il est bon, néanmoins, d'éviter (§ 133 et 137).

**108. Restrictions à faire sur la valeur énergétique des aliments: aliments nervins.** — En expliquant que les substances alimentaires se comportent en combustible vrai, nous n'avons pas manqué de spécifier que l'organisme n'est jamais *indifférent* à leur égard (§ 97): il faut qu'il puisse les assimiler et en tirer *des réserves*. Les machines thermiques — qu'elles soient à foyer interne ou à foyer externe — brûlent au contraire, tout combustible capable de développer de la chaleur.

Mais il est des substances dont l'action paraît s'exercer sur la *matière vivante directement*, sur la fibre musculaire ou nerveuse, et qui s'accompagnent d'effets peu en rapport avec leur énergie calorifique. On les a appelées *aliments nervins*; et parce que certaines d'entre elles *réduisent la dépense énergétique*, on les dit aussi: *aliments d'épargne* ou *dynamophores*. Citons notamment les suivants: café, thé, maté, coca, kola, piment, acide butyrique, sel marin, alcool ordinaire, etc.

(1) Nous verrons (§ 110) notamment les expériences d'Atwater sur l'homme (*Bull.*, n° 136, p. 167; 1903).

(2) A. Chauveau (*Comptes Rendus Sciences*, 28 janvier 1907, p. 173); Jules Amar (*ibid.*, 19 février 1912, p. 528; *Journal de Physiol.*, 1912, p. 298).

(3) A. Chauveau (*Comptes Rendus Sciences*, t. CXXXII, p. 194; 1901; — octobre 1904, p. 53).

A la vérité, leur action est complexe; la plupart d'entre eux, à doses assez faibles, sont *toxiques*, et se révèlent surtout par les troubles *nerveux* qu'ils déterminent.

Mais quelques-uns jouent un rôle dans le métabolisme alimentaire, peut-être comme excitants cellulaires analogues aux sels de zinc vis-à-vis de l'*Aspergillus* (§ 97); et le caractère toxique s'atténue chez nombre de personnes qui absorbent souvent telle ou telle de ces substances.

Le principe actif du café, du thé, de la noix de kola, du cacao, est la *caféine*, un alcaloïde dérivé d'un corps analogue: la *theobromine*, tous deux existant dans les « aliments » que nous considérons; d'autres produits alcaloïdiques s'y rencontrent: la *kolatine*, la *kolanine*, la *bétaïne*, proches parents de la caféine.

La consommation de ces « aliments » est généralement faible, sauf en certaines contrées; on les prend en *infusions* ou en *decoctions*.

Le *thé* est en feuilles desséchées, représentant 3 Calories environ par gramme; de même le *maté* qui est le thé du Paraguay (aussi appelé thé des Jésuites ou des missions); de même enfin le *Catha Edulis* des Afghanistans (1).

Le *café* et la *coca* donnent 4 Calories par gramme, et sont aussi répandus que le thé. Le café a un caractère de quasi-universalité; la coca est très en usage auprès des Péruviens et des Boliviens; le thé, auprès des Marocains, Anglais, Russes, etc. (2).

La *noix de kola*, d'un poids moyen de 7 grammes, est très répandue en Afrique, principalement dans la Côte d'Ivoire; son apport énergétique est de 3,75 Calories par gramme, à l'état sec; on la prend en infusion, associée souvent à la coca; les indigènes la mâchent, et en retirent une excitation neuromusculaire (3) qui leur profite.

(1) J.-Fr. Owen (*Journ. of the Soc. of chem. indust.*, t. XXIX, p. 4091; numéro du 30 septembre 1910).

(2) La consommation a atteint, en 1908, par année et par habitant. 2.850 grammes de thé en Angleterre contre 32 grammes en France. D'après nos observations, le Marocain consomme près de 4.000 grammes (population aisée).

(3) Auguste Chevalier et Em. Perrot, *les Kolatiers et les Noix de Kola*, Paris, 1911; voir p. 253 et suiv. — *Bull. Soc. géogr. commerciale*, mai 1906, p. 304.

TABLEAU DES ALIMENTS NERVIENS

| PRODUITS<br>(100 gr.)        | PRINCIPE ACTIF | PROTÉIQUES | GRAISSES | HYDRATES<br>de<br>CARBONE | POUVOIRS<br>CALORIFIQUES (1) |
|------------------------------|----------------|------------|----------|---------------------------|------------------------------|
| Thé (sec).....               | Caféine.....   | 21,19      | 2,12     | 54,24                     | 328 Cal, 55                  |
| Café torréfié.....           | —.....         | 13,05      | 12,40    | 54,76                     | 390 ,86                      |
| Maté (sec).....              | —.....         | 11,35      | 5,60     | 62,30                     | 352 ,92                      |
| Coca (feuilles).....         | Cocaine.....   |            |          |                           |                              |
| Kola (sèche).....            | Caféine.....   | 11,61      | 1,41     | 73,46                     | 375 ,86                      |
| Piment (sec).....            | Capsicine..... | 12,77      | 8,45     | 35,58                     | 275 ,13                      |
| Bière de Strasbourg.....     | Alcool.....    | 0,409      | »        | 5,487                     | 24 Cal, 174                  |
| Cidre du Mans.....           | —.....         | 0,052      | 0,004    | 2,985                     | 12 ,49                       |
| Cidre normand.....           | —.....         | 0,046      | »        | 3,582                     | 14 ,87                       |
| Vin de Bordeaux { blanc..... | —.....         |            |          |                           |                              |
| rouge.....                   | —.....         |            |          |                           |                              |
| Vin de Saunterne.....        | —.....         |            |          |                           |                              |
| Champagne mousseux.....      | —.....         |            |          |                           |                              |
| Vin de Madère.....           | —.....         |            |          |                           |                              |
| Vin de Chianti.....          | —.....         |            |          |                           |                              |
| Vin Pomard vieux.....        | —.....         |            |          |                           |                              |
|                              |                |            |          | 0,180                     |                              |
|                              |                |            |          | 0,400                     |                              |

(1) La valeur calorifique du principe actif n'intervient pas dans nos calculs.

Le *piment* (*Capsicum annum*) est un produit colonial, piquant au goût, renfermant un alcaloïde, la *Capsicine* : il développe environ 2,75 Calories par gramme de matière sèche. On en fait grand usage dans diverses contrées de l'Afrique et de l'Asie.

L'*acide butyrique* est dû à l'oxydation lente du beurre, auquel il donne le goût de « ranci ». Young, puis Boussingault <sup>(1)</sup>, avaient signalé le *caractère d'épargne* que possède cette substance; elle favorise l'engraissement <sup>(2)</sup>. C'est ainsi que diverses populations ne consomment le beurre qu'à l'état ranci <sup>(3)</sup>. On ne saurait affirmer qu'il s'agit là d'une simple action vitaminique.

Le *chlorure de sodium* intervient dans le métabolisme du corps pour *protéger* du gaspillage les protéïques <sup>(4)</sup>, stimuler les sécrétions et contribuer à une meilleure utilisation digestive.

Enfin, l'*alcool ordinaire* ou *alcool éthylique* C<sup>2</sup>H<sup>6</sup>O se rencontre dans toutes les liqueurs fermentées; il développe, en brûlant dans la bombe calorimétrique : 7,067 Calories par gramme <sup>(5)</sup>. A dose élevée, c'est un poison dangereux. Il entre dans des liqueurs qui, par leurs éléments sucrés et protéïques, sont quelque peu alimentaires.

Pour tous les aliments nervins, deux questions se posent :

1° Brûlent-ils dans l'organisme en donnant des calories ?

2° Et s'ils ne brûlent pas, quelle en est la dose toxique, et quelle est, au contraire, celle qui remplit un rôle de stimulant digestif ou, surtout, neuro-musculaire ? On essaiera, plus tard, de répondre à ces questions (§ 158).

**109. Rations alimentaires et dépense énergétique.** — Que l'alimentation soit la source d'énergie du moteur vivant, on pouvait l'admettre par analogie avec les autres moteurs, car

(1) Boussingault, *Econ. rurale*, II, p. 473 ; 1844.

(2) Osborne et Mendel (*Journ. Biol. Chem.* 1913, t. XVI, p. 423).

(3) Jules Amar, *le Rendement...*, *loc. cit.*, p. 76.

(4) A. Pugliese (*Arch. d. farm. e terap.*, t. II, 1895); *id.* et Coggi (*Riv. di Igiene e Sanita pubblica*, 1895, 6<sup>e</sup> année); Maurel (*Comptes Rendus Biol.*, 1897, p. 215); R. Tuteur (*Zeitschr. f. Biol.*, t. LIII, p. 361 ; 1909).

(5) Atwater et Benedict (*Bulletin*, n° 63, p. 54 ; 1899).

nous n'en sommes plus à l'époque où un médecin allemand, Reech, osait encore soutenir le principe d'une chaleur animale *héréditaire*, ce qui, en passant, lui valut cette boutade de Robert Mayer : « Je lui souhaite (à Reech), pour le récompenser de son idée, un poêle de chambre qui lui serve, à mesure de ses besoins, la chaleur puisée antérieurement dans un ancêtre haut fourneau (1843). »

Malgré cela, une démonstration expérimentale s'imposait, qui vérifiât le principe de la conservation de l'énergie dans le monde vivant. Tentée par Hirn (1855), complétée par Rubner (4) et Chauveau (1899), elle fut achevée par l'école américaine d'Atwater. L'œuvre de cette école est considérable ; ses résultats généraux sont contenus dans les *Bulletins* nos 136 (1903), 175 (1907) et 208 (1909).

Voici, brièvement (2), la technique suivie : L'homme séjourne dans une *chambre calorimétrique* cubant environ 5 mètres, exigüe, sans doute, mais où le séjour n'offre aucune gêne (3). Les parois sont sillonnées par une canalisation où circule de l'eau à température connue, dont le but est d'absorber la chaleur rayonnée intérieurement par le sujet ; une fenêtre éclaire la pièce. De plus, une ventilation énergique renouvelle l'air de la chambre, tandis que des aspirateurs effectuent, à l'entrée comme à la sortie de l'air, un *échantillonnage périodique*. On sait donc, à tout moment, par la quantité d'eau débitée et sa variation de température, quelle quantité de *chaleur* s'est manifestée dans le calorimètre. On lit la température avec une exactitude de  $\frac{1}{100}$  de degré. Par l'analyse

des gaz et le volume d'air circulant, on sait encore les poids d'*oxygène* consommé et d'*acide carbonique* exhalé. La teneur de l'air en *vapeur d'eau*, avant et après sa traversée, et la

(1) Rubner (*Zeitsch f. Biol.*, t. XXX, 1894).

(2) Le détail peut en être suivi dans les 792 pages in-8° des bulletins sus-mentionnés ; un résumé clair et méthodique en a été donné par Jules Lefèvre dans son remarquable *Traité de Bioénergétique* (p. 165 et suiv.), ouvrage déjà cité.

(3) Il y a lieu de faire une petite réserve sur ce point, quand il s'agit de l'homme effectuant un grand travail (voir *Bull.*, n° 136, p. 81 et 109).

quantité d'eau condensée finalement dans la pièce fournissent tout le *poids d'eau évaporée* par les poumons et par la peau (*perspiration*). Enfin un *bicycle fixe avec frein ergométrique* permet d'effectuer un certain travail (nous y reviendrons). Il est ainsi possible, pour un expérimentateur, de noter et de calculer la *dépense énergétique* de l'homme dans un temps déterminé, soit au *repos* (valeur statique), soit au *travail* (dépense supplémentaire ou dynamique).

L'exactitude de l'appareil, surtout dans les études statiques, est telle que de l'*alcool* y brûle en accusant la chaleur de combustion trouvée par la bombe calorimétrique.

Mais il s'agissait de confronter, avec la dépense mesurée, la valeur énergétique de la ration alimentaire vraiment métabolisée. Dans ce but, la ration est analysée sur échantillons, et sa chaleur de combustion totale déterminée; on en déduit celle des urines et *féces* récoltées. Les équations de combustion sont alors utilisées: on calcule le poids de protéiques oxydés d'après le poids d'*urée* contenue dans l'urine, et les poids de graisses d'après celui du carbone des gaz expirés ( $\text{CO}_2$ ), déduction faite du carbone d'origine protéique. Atwater suppose que les hydrates de carbone, en réserve dans les cellules, ne sont pas attaqués (1). Ce *postulat*, l'expérience l'a légitimé dans le cas de rations contenant assez d'hydrates de carbone.

Sachant toutes les substances, en quantité et en qualité, utilisées par le travail physiologique du sujet, on *calcule* exactement la dépense. Comparant, ensuite, celle-ci à la dépense mesurée, on vérifie le *principe de la conservation de l'énergie*. La concordance fut toujours satisfaisante, même très satisfaisante, pour plusieurs centaines d'expériences, d'une durée de un à quatre jours chacune, et sur six à sept sujets différents (2).

(1) *Bulletin* n° 136, p. 125.

(2) La superposition des résultats, masquant les écarts, conduit à une exactitude de  $\frac{1}{20.000}$ ; s'extasier devant cette rigueur de la méthode, c'est oublier que les meilleurs calorimètres ne sont pas exacts à plus de  $\frac{1}{1000}$ , et que c'est là une pure coïncidence.

Ainsi la chambre calorimétrique étant maintenue à 20°, on eut :

| POIDS<br>DU SUJET | DÉPENSE STATIQUE |          | DÉPENSE DYNAMIQUE BRUTE |          |
|-------------------|------------------|----------|-------------------------|----------|
|                   | CALCULÉE         | MESURÉE  | CALCULÉE                | MESURÉE  |
| kilogrammes       | Calories         | Calories | Calories                | Calories |
| 65                | 2.119            | 2.133    | 3.559                   | 3.544    |
| 70                | 2.279            | 2.283    | 3.892                   | 3.861    |
| 70                | 2.305            | 2.337    | »                       | »        |
| 76                | 2.357            | 2.397    | 5.143                   | 5.135    |
| Erreur...         | + 0,96 0/0       |          | — 0,43 0/0              |          |

La ration employée était mixte, comprenant du pain, du bœuf, lait, beurre et biscuits, et la boisson consistait en une légère infusion de café.

La dépense statique, c'est-à-dire de l'homme au repos, ne s'occupant, durant les vingt-quatre heures, que de changer de linge, faire son lit, manger, lire, écrire, représente une moyenne de 32<sup>Cal</sup>,56 par kilogramme de poids du corps; le tableau précédent en fait foi; de sorte que, dans un milieu à 20°, l'homme adulte, pesant 65 kilogrammes, dépense statiquement

$$32,56 \times 65 = 2.120 \text{ Calories par jour.}$$

Mais la *dépense brute* du travail (statique + dynamique) varie avec le poids du sujet, et surtout avec la grandeur de son travail. Elle concerne donc l'activité proprement musculaire dont il sera bientôt question.

**110. Analyse de la dépense énergétique.** — I. *Dépense statique.* — D'après les mesures des savants américains, nous allons analyser la dépense statique et la dépense dynamique brute de deux heures en deux heures. Le sujet pèse 76 kilogrammes en moyenne et est âgé de vingt-deux ans; il est robuste. On a trouvé, avec une alimentation mixte et à une température de 20° :

| HEURES    | DEPENSE<br>STATIQUE   | EAU EXHALEE<br>ET PERSPIRÉE | CO <sup>2</sup><br>ÉLIMINÉ | Oxygène consommé<br>total = 689 gr.                         |
|-----------|-----------------------|-----------------------------|----------------------------|---|
| Journée   | 7 à 9                 | 253 <sup>C</sup> ,4         | 85 <sup>gr</sup> ,50       | 90 <sup>gr</sup> ,20  |
|           | 9 à 11                | 232 ,9                      | 74 ,50                     | 73 ,60  |
|           | 11 à 13               | 210 ,3                      | 72 ,20                     | 66 ,60  |
|           | 13 à 15               | 231 ,3                      | 75 ,80                     | 85 ,90  |
|           | 15 à 17               | 224 ,8                      | 74 ,70                     | 70 ,90  |
| 17 à 19   | 216 ,8                | 79 ,30                      | 75 ,20                     | Poids des urines :<br>1.421 <sup>gr</sup> ,80.              |
| Nuit      | 19 à 21               | 219 ,8                      | 71 ,50                     | 67 ,60  |
|           | 21 à 23               | 213 ,0                      | 74 ,20                     | 69 ,50  |
|           | 23 à 1                | 145 ,2                      | 70 ,80                     | 59 ,50  |
|           | 1 à 3                 | 154 ,9                      | 69 ,40                     | 50 ,20  |
|           | 3 à 5                 | 140 ,4                      | 63 ,70                     | 51 ,90  |
|           | 5 à 7                 | 154 ,2                      | 69 ,70                     | 51 ,00  |
| 24 heures | 2.397 <sup>C</sup> ,0 | 881 <sup>gr</sup> ,00       | 812 <sup>gr</sup> ,10      | CO <sup>2</sup> en volume :<br>812,10<br>1,9769 en litres.  |
|           |                       |                             |                            | O <sup>2</sup> en volume :<br>689<br>1,429 en litres.       |
|           |                       |                             |                            | Quotient respira-<br>toire :<br>$\frac{CO^2}{O^2} = 0,853.$ |

Il résulte de ce tableau que la dépense varie au cours des vingt-quatre heures; elle présente un *minimum* entre vingt-trois heures et une heure, c'est-à-dire au plus profond du sommeil, *la nuit*, quand le corps est bien reposé. A ce moment, la dépense est de 145 Calories en deux heures, ce qui ferait en vingt-quatre heures : 1.740 Calories pour un sujet de 76 kilogrammes, et  $\frac{1.740}{76} \times 65 = 1.488$  Calories pour l'adulte normal de 65 kilogrammes. Ainsi, au repos complet, les muscles étant dans un bon état de relâchement, la dépense par kilogramme de poids du corps est de :  $\frac{1.740}{76} = 22^{\text{Cal}}$ ,89 au lieu de  $32^{\text{Cal}}$ ,56, environ les  $\frac{7}{10}$ .

La dépense de la *nuit* (de dix-neuf heures à sept heures) est plus faible que celle de la journée (de 7 heures à dix-neuf heures), soit 43 et 57 centièmes de la dépense totale (*fig. 133*).

Rapportée au volume d'*oxygène*, l'énergie totale correspond à  $\frac{2.397 \times 1,429}{689} = 4^{\text{Cal}}$ ,97 par litre (à 0° et 760 millimètres).

Toute la chaleur des combustions intraorganiques est rejetée au dehors et s'y retrouve, puisqu'il n'y a pas de travail. Il faut y comprendre celle que l'air *expiré*, entrant à 20° dans les poumons et les quittant à 37°, emporte dans son échauffement. Comme la *chaleur spécifique* d'une substance est la quantité de chaleur qu'elle absorbe, par gramme, pour s'échauffer de 1°, on pourrait calculer en calories cette fraction de la dépense ; la chaleur spécifique de l'air est 0°,2374. De même il y a un départ effectué par les *urines* et les *feces* dont les chaleurs spécifiques (assez arbitraires) sont : 1 calorie et 0°,9. Mais c'est l'*eau vaporisée* par les poumons et sur la peau qui dissipe une fraction notable de l'énergie. On la calcule en se basant sur sa *chaleur de vaporisation*, qui est la quantité de chaleur absorbée par gramme pour passer à l'*état de vapeur* sans changer de température.

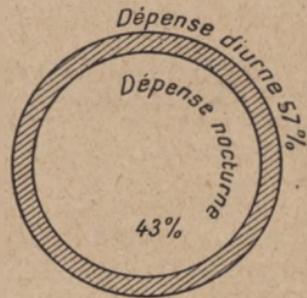


FIG. 133.

Regnault avait trouvé pour l'*eau* la relation connue :

$$q = 606,5 - 0,695 \times t,$$

$t$  étant la température de vaporisation, et  $q$  la chaleur dépensée exprimée en petites calories.

Les gaz expirés emportent de la vapeur formée à 37° environ, température des poumons ; d'où :

$$q = 606,5 - 0,695 \times 37 = 580,8 \text{ petites calories.}$$

Il faut aussi considérer que cette eau vaporisée entre dans le corps à une température  $t'$  et y atteint 37° ; de sorte qu'elle s'échauffe de  $(37^\circ - t')$ , et absorbe  $(37^\circ - t')$  calories par gramme (la chaleur spécifique de l'eau étant l'unité). Ajoutant, on écrira :

$$q' = (606,5 - 0,695 \times 37) + (37 - t') = 606,5 - 37(0,695 - 1 + t')$$

ou enfin :

$$q' = 606,5 + 37 \times 0,305 - t'.$$

Ainsi, l'eau étant prise à  $t' = 20^\circ$ , on aurait :

$$q' = 598 \text{ petites calories par gramme d'eau.}$$

On mesure donc ainsi la *chaleur totale de vaporisation*.

Regnault avait donné une formule plus complète qui conduirait, dans notre cas, au nombre de 595 calories. Atwater et Rosa ont adopté à raison du refroidissement de la vapeur de  $37^\circ$  à  $20^\circ$ , 592 petites calories ou  $0^{\text{Cal}},592$  en grandes calories (1) :

La quantité d'eau vaporisée, convertie en chaleur de vaporisation, représente une fraction de la dépense, comprise entre 20 et 25 0/0 de la dépense totale. On a, dans l'exemple ci-dessus :

$$881 \times 0^{\text{Cal}},592 = 521^{\text{Cal}},55.$$

De l'ensemble de leurs expériences, sur des hommes de vingt-deux à trente-quatre ans, les savants américains concluent que les pertes que nous venons de spécifier se montent à 25 0/0, les 75 0/0 de l'énergie se dissipant par *radiation* de la surface du corps dans un milieu à  $20^\circ$ , et par la *convection* (le mouvement) de l'air sur cette surface (voir § 173).

Il pourrait y avoir une cause d'erreur, si la température du corps du sujet variait, si, entrant avec  $36^\circ,7$ , par exemple, il sortait de la chambre calorimétrique avec  $37^\circ,7$ . C'est que, dans ce cas, une élévation de  $1^\circ$  correspond à une *absorption* par le corps de  $0^{\text{Cal}},83 \times 65 = 54$  Calories, la chaleur spécifique du corps humain (2) étant  $0,83$ , et le poids de l'adulte 65 kilogrammes. Il y aurait perte de 54 Calories en cas d'abaissement de la température. Mais, au repos, celle-ci varie peu, et l'heure de la sortie était généralement la même que celle de l'entrée. De toutes façons, la température était notée toutes les quatre minutes au moyen d'un thermomètre placé dans le *rectum* et relié avec un dispositif électrique : on pouvait lire sur un galvanomètre le  $\frac{1}{100}$  de degré (3). Les variations journalières

(1) Atwater et Rosa (*Bull.*, n° 63, p. 59; 1899).

(2) Pembrey : *Schaefer's Textbook of physiol.*, I, p. 839; 1898; Rosenthal (*Arch. de physiol.*, 1875).

(3) Benedict et Snell (*Pflüger's Arch.*, t. LXXXVIII, p. 492; t. CX, 33; 1901-1902).

de la température rectale d'un homme au repos et bien alimenté sont représentées sur le graphique (fig. 134).

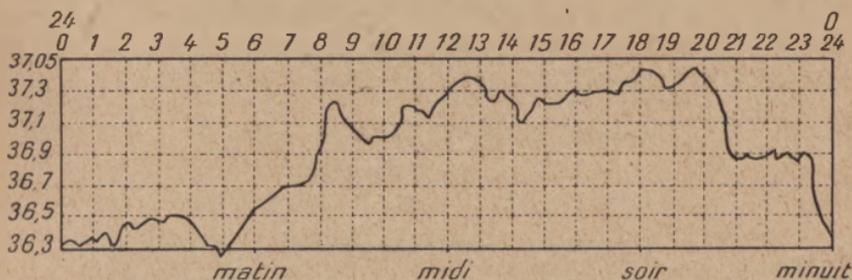


FIG. 134. — Courbe de la température de l'homme dans une période de 24 heures.

L'intérêt de l'évaluation correcte de la dépense statique est de nous montrer qu'elle s'abaisse très fortement par le repos de la nuit, à l'heure où la température du corps est minimum; elle n'est que de 1.488 Calories par vingt-quatre heures, et comprend ainsi la valeur du rayonnement du corps et de la convection de l'air dans un milieu à 20°; mais cette valeur, pour un homme d'ailleurs revêtu de linge de coton fin (Atwater) et couvert des draps du lit, est faible; elle n'est cependant pas négligeable; appelons-la  $x$  (voir § 184 le calcul de  $x$ ). La dépense ( $1488 - x$ ) est celle d'un adulte tout à fait au repos; elle est strictement consacrée au travail intérieur des organes de la vie (respiration, circulation, digestion); c'est la *dépense physiologique minimum*. Par exemple, un adulte qui serait au repos, dans un milieu à 37°, pour n'avoir pas à rayonner de la chaleur, dépenserait en vingt-quatre heures ( $1.488 - x$ ) Calories.

**111. Le métabolisme basal.** — On a donné le nom de *métabolisme basal* au nombre de calories rayonnées par mètre carré de surface du corps, à l'état de repos musculaire complet et de digestion achevée. C'est évidemment supérieur à la dépense d'énergie physiologique *minimum*, rapportée aussi au mètre carré.

A notre avis, la valeur qui exprime en calories le métabolisme basal est loin d'être significative d'un état bien défini; car, manifestement, l'influence de la température y est négligée.

Néanmoins elle a cours parmi les physiologistes. C'est ainsi que Benedict et Harris l'ont déterminée sur 136 hommes, 103 femmes et 94 enfants (1). Et ils l'expriment par une formule où figurent le poids, la taille, l'âge. Pour eux, la dépense basale en calories par vingt-quatre heures est :

$$\begin{aligned} D_s &= 66,473 + 13,752 P + 5,003 T \\ &\quad - 6,755 A, \text{ pour l'homme;} \\ D_s &= 655,096 + 9,561 P + 1,850 T \\ &\quad - 4,676 A, \text{ pour la femme.} \end{aligned}$$

La taille T est en centimètres, l'âge A en années, le poids P en kilogrammes. Et ces formules seraient valables pour des personnes de vingt et un à soixante-dix ans, pesant de 25 à 125 kilogrammes, et mesurant de 1<sup>m</sup>,51 à 2 mètres.

Étant choisi un homme moyen (65 kilogrammes et 1<sup>m</sup>,65) âgé de vingt-cinq ans, on trouverait 1.617 calories environ, nombre supérieur à la dépense nocturne rapportée à vingt-quatre heures, et ci-dessus évaluée à 1.488 calories.

Au reste, de telles formules nous paraissent manquer de rigueur, encore que Benedict les croie applicables aux enfants.

L'exemple précédent conduirait à une dépense de 33<sup>cal</sup>,70 par mètre carré de surface du corps et par heure.

Un ensemble de recherches sur gens valides, ou convalescents, sur nains et culs-de-jatte, a donné 39<sup>cal</sup>,70, avec des écarts de 10 0/0 au maximum (2). Chez les athlètes on constate un excès de 9 0/0, à taille et à poids égaux (3). Les diminutions accusent un état pathologique (4), quand elles dépassent 15 0/0, car dans les cas de sous-alimentation, où la ration d'entretien est abaissée du tiers de sa valeur, on a un métabolisme basal réduit seulement de 10 0/0, comme on le verra plus loin (§ 164).

(1) Benedict et Harris (*Proceed. Nat. Acad. Sc., U. S. A.*, 1918 ; IV, p. 370); — Benedict (*ib.*, 1920, VI, p. 9). Public. n° 279, p. 190.

(2) James Means (*Journ. Biol. Chemist.*, 1905, t. XXI, p. 263); — Benedict, Emmes, Roth et Smith (*ibid.*, 1914, t. XVIII, p. 139); — Gephart et Du Bois (*Arch. of inter. Med.*, 1916, t. XVII, p. 902).

(3) M. Smith (*J. Biol. Chem.*, 1915, t. XX, p. 243).

(4) Gephart et Du Bois (*loc. cit.*).

Mais il est intéressant de noter, en conformité avec notre observation, que dans les climats chauds, aux tropiques, le métabolisme basal tombe à  $30^{\text{cal}}$ ,35 au lieu de 39,70, c'est-à-dire de 24 0/0.

C'est un résultat acquis, malgré les erreurs de l'auteur, Ozorio de Almeida <sup>(1)</sup>, qui, s'étant servi de la méthode respiratoire, adopte  $4^{\text{cal}}$ ,739 au lieu de  $4^{\text{cal}}$ ,90 pour le litre d'oxygène, et trouve des quotients respiratoires variant de 0,75 à 1,18! Mais cela n'atteint pas gravement les conclusions.

Au-dessous de vingt ans, les déterminations conduisent à un métabolisme basal qui diffère de celui des formules précédentes. Il a été directement évalué chez les tout jeunes enfants <sup>(2)</sup> et les fillettes de douze à dix-sept ans <sup>(3)</sup>. Chez ces dernières on a obtenu de 30,9 à 21,2 calories par kilogramme-jour.

Dreyer <sup>(4)</sup> a donné une formule générale pour chacun des deux sexes, mais d'un calcul moins commode que les précédentes.

L'intérêt de ces recherches est qu'elles permettront de serrer de plus près la notion plus scientifique de dépense physiologique minimum.

112. II. *Dépense dynamique*. — Donnons, comme précédemment, un tableau analytique de la *dépense dynamique brute* (statique + dynamique) pour le sujet déjà considéré (§ 110), et soit un travail de huit heures équivalant à  $603^{\text{cal}}$ ,80. Le travail est effectué sur le *bicycle à frein*; le principe de cet instrument, plusieurs fois modifié, c'est que la roue d'arrière est pleine et tourne entre les pôles d'un électro-aimant où elle éprouve une résistance; son travail est alors converti en chaleur (§ 41) et s'ajoute à la chaleur rayonnée par le corps

<sup>(1)</sup> *Journ. de Physiol. et de Path.*, 1920, p. 743, 958.

<sup>(2)</sup> Benedict et Talbot, *Publication n° 302*, page 206 (Washington, 1921).

<sup>(3)</sup> Benedict, Hendry et Baker (*Proceed. Acad. Sc.*, 1921, VII, n° 1); — Benedict et Mary Hendry (*Boston Med. and Surgical Journal*, mars 1921).

<sup>(4)</sup> G. Dreyer (*Lancet*, 1920, II, p. 290).

humain, dans le *calorimètre* (1). On mesure, par conséquent toute la dépense dynamique brute, et l'on trouve :

| HEURES    | DÉPENSE<br>DYNAMIQUE<br>brute | EAU EXHALÉE<br>et<br>PERSPIRÉE | CO <sub>2</sub><br>ELIMINE |                                    |   |
|-----------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------------|---|
| Journée   | 7 à 9                         | 464 <sup>C</sup> ,3            | 242 <sup>sr</sup> ,50      | 164 <sup>r</sup> ,90               | Oxygène total consommé = 1.558 <sup>sr</sup> ,80.   |
|           | 9 à 11                        | 785 ,1                         | 529 ,90                    | 276 ,50                            |   |
|           | 11 à 13                       | 645 ,9                         | 475 ,00                    | 241 ,60                            | Poids des urines :<br>2.401 <sup>sr</sup> ,80.  |
|           | 13 à 15                       | 536 ,0                         | 288 ,80                    | 154 ,90                            |   |
|           | 15 à 17                       | 813 ,1                         | 579 ,40                    | 283 ,00                            |   |
| 17 à 19   | 645 ,4                        | 488 ,60                        | 215 ,10                    |                                    |   |
| Nuit      | 19 à 21                       | 292 ,6                         | 125 ,00                    | 98 ,70                             | $\frac{CO_2}{O_2} = 0,815.$   |
|           | 21 à 23                       | 282 ,0                         | 138 ,40                    | 91 ,10                             |   |
|           | 23 à 1                        | 193 ,9                         | 113 ,30                    | 63 ,30                             | Périodes de travail :<br>8 <sup>h</sup> 15 à 10 <sup>h</sup> 15 = 145 <sup>Cal</sup> ,50<br>10 <sup>h</sup> 30 à 12 <sup>h</sup> 30 = 145 ,50<br>14 <sup>h</sup> à 16 <sup>h</sup> = 154 ,90<br>16 <sup>h</sup> 15 à 18 <sup>h</sup> 15 = 157 ,90 |
|           | 1 à 3                         | 187 ,3                         | 119 ,40                    | 59 ,60                             |   |
|           | 3 à 5                         | 166 ,2                         | 102 ,40                    | 52 ,10                             |   |
| 5 à 7     | 164 ,4                        | 94 ,90                         | 58 ,90                     |                                    |   |
| 24 heures | 5.176 <sup>C</sup> ,62        | 3.297 <sup>sr</sup> ,60        | 1.759 <sup>sr</sup> ,70    | 8 heures et 603 <sup>Cal</sup> ,80 |   |

Ce tableau montre clairement que le travail a élevé la dépense, et que, après sa cessation, le repos ne s'acquiert pas brusquement; *il est graduel* (voir § 133); il y a, en un mot, une *vitesse des réactions vitales* qui ne reprend pas sa valeur initiale tout de suite à la fin du travail.

Rapportée au litre d'oxygène, l'énergie totale donne :

$$\frac{5.176,20 \times 1,429}{1.558,80} = 4^{\text{Cal}},75.$$

Ce pouvoir calorifique diffère un peu de celui qui a été obtenu au repos; toutefois, en superposant les résultats, les savants américains arrivent sensiblement à une valeur moyenne de 4<sup>Cal</sup>,90 (§ 117).

(1) La roue avait 0<sup>m</sup>,405 de diamètre (Bull. n° 208, p. 12; 1909), soit 1<sup>m</sup>,27 de circonférence; à chaque coup de pédale l'effort atteignait 7<sup>kg</sup>,73. Une étude complète de ce bicycle a été donnée par Benedict et Cady dans la *Publication* 167 de l'Institution Carnegie, Washington, 1912 (ne pas confondre avec *Bulletin*).

La chaleur emportée par l'eau vaporisée (sur les poumons et sur la peau) représente :

$$3.297,60 \times 0^{\text{Cal}},592 = 1.952^{\text{Cal}},18, \quad \text{soit} \quad \frac{1.952,18}{5.170,20} = 37,70/0$$

de la dépense totale. Cette proportion se modifie avec l'intensité du travail, mais pas tout à fait régulièrement.

Déduisons la dépense statique (2.397 Calories) des 5.176<sup>Cal</sup>,20 dépensés pour effectuer un travail de 603<sup>Cal</sup>,80 ; nous aurons comme dépense dynamique :

$$5.176,20 - 2.397 = 2.779^{\text{Cal}},20;$$

le travail moteur n'en est donc qu'une faible fraction :

$$\frac{603,8}{2.779,2} = 21,70/0;$$

La température du corps, au cours du travail, oscille parfois de 1° ; mais, tandis que le séjour dans la chambre calorimétrique a élevé de 0°,03 en vingt-quatre heures la température de l'homme au repos, il l'a, au contraire, abaissée de 0°,06 les jours de travail ; en d'autres termes, cette température tend à s'abaisser après le travail (1).

Enfin, pour conclure, nous voyons qu'il faut une ration de 5.176<sup>Cal</sup>,20 quand le travail équivaut à 603<sup>Cal</sup>,80 ou 260.000 kilogrammètres, *quantité maximum* fournie par les ouvriers, à de rares exceptions près.

**113. Combustible préféré des moteurs animés.** — La ration alimentaire est généralement mixte ; les réserves du corps, source de son énergie, de sa dépense, sont donc un mélange de graisses, de protéiques et d'hydrates de carbone. Chacune de ces substances type ne pourrait pas, indifféremment, servir de source *exclusive* d'énergie, puisque le moteur animé exige au moins 65 grammes de protéiques, que, même à jeun, il les prendrait sur sa propre substance, et qu'enfin — trait fondamental — la quantité de protéiques utilisée n'est jamais suffisante pour couvrir les frais de l'état de travail ;

(1) Atwater et Benedict (*Bull.*, n° 136, p. 154 ; 1903).

cette démonstration fut donnée par Fick et Vislicénus dans leur ascension au Faulhorn <sup>(1)</sup> : l'urée des urines recueillies permettait de calculer (§ 107) une valeur de la dépense bien au-dessous de celle du travail. Donc, l'organisme n'accepte pas un combustible exclusivement protéique. Chauveau, puis Atwater (§ 104), confirmèrent ce résultat ; c'est ainsi que sur une dépense de 9.314 Calories, seulement 478 Calories eurent une origine protéique <sup>(2)</sup> ; on atteint rarement à 500 ou 600 Calories. En conséquence, les moteurs animés dépensent abondamment en aliments ternaires, graisses et hydrates de carbone. Pourrait-on dire que ceux-ci se comportent de la même façon, et se dépensent d'après leurs pouvoirs calorifiques ? Pour prendre des chiffres, les 9<sup>Cal</sup>,40 fournis par 1 gramme de réserve grasse pourraient-elles être substituées par des hydrates de carbone à raison de 4<sup>Cal</sup>,20 par gramme, c'est-à-dire par  $\frac{9,4}{4,20} = 2^{\text{sr}},24$  de ces hydrates ? Admettre ce point de vue, ce serait défendre l'*isodynamie*, en vertu de laquelle les principes immédiats se substituent les uns aux autres proportionnellement à leurs chaleurs de combustion, à 4,20, 9,40 et 4,75, d'après les déterminations de Berthelot au calorimètre. Ce qui conduit aux proportions pondérales suivantes :

Hydrates de carbone : 100, graisses : 44,7, protéiques : 88,4.

Mais l'expérience n'a pas toujours confirmé cette doctrine ; la méthode de d'Atwater aboutit à 4<sup>Cal</sup>,40, au lieu de 4<sup>Cal</sup>,75 pour la chaleur de combustion des protéiques (§ 100) ; elle a montré de plus que, pour un même travail, dans des conditions aussi identiques que possible, la dépense est moindre avec les hydrates de carbone qu'avec les graisses, ou la ration sucrée est plus économique que la ration grasse : ce qui supposerait pour les graisses une valeur inférieure à celle qui leur est assignée théoriquement. Dans un cas, il s'est même trouvé que le calcul de la dépense, basé sur une utilisation *isodynamique* de 7.744 Calories de graisses, fût en

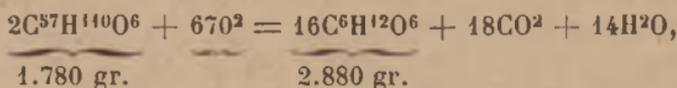
(1) Fick et Vislicénus (*Arch. sc. nat.*, 1868, p. 273)

(2) Atwater et Benedict (*Bull.* n° 136. p. 188; 1903)

*excès* de 667 calories sur la dépense mesurée (1). L'isodynamie, pourtant correcte sur l'homme *au repos*, valable encore s'il est nourri avec une ration mixte *abondante en hydrates de carbone*, ne se défend plus si l'homme travaille beaucoup ou prend des rations insuffisantes. Dans ces conditions, Chauveau et Seegen admirent que les réserves se transforment en *glucose* dans les cellules vivantes et brûlent *sous cet état*. Deux quantités d'aliments sont alors énergétiquement équivalentes si elles se transforment en des poids égaux de *glucose*, si elles sont *isoglucosiques*. La doctrine de l'*isoglucosie* complète celle de l'isodynamie : elle ne s'y oppose pas.

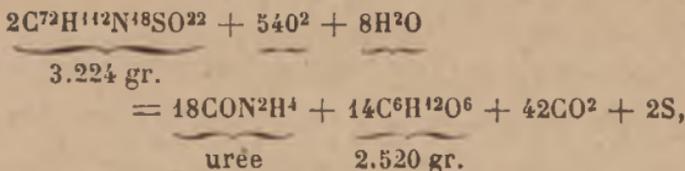
Quant aux équations de transformation, elles ne sont pas absolument démontrées :

1° Soit une graisse, la *tristéarine*  $C^{57}H^{110}O^6$  ; elle donnerait :



soit 1 *gramme de glucose par 0<sup>sr</sup>,618 de graisse*, et le rapport  $\frac{CO^2}{O^2} = \frac{18}{67} = 0,27$  montre que la fixation d'oxygène au cours de cette métamorphose doit *abaisser* le quotient respiratoire. En fait, cet abaissement s'observe dans un *travail intense*(2) et pendant le sommeil, période apparente de l'élaboration *glucosique*.

2° Soit une *albumine*. On aurait :

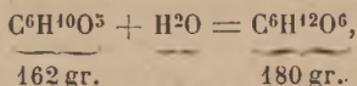


(1) Atwater et Benedict (*Bull.* n° 136, p. 175 et 307 ; 1903).

(2) Atwater et Benedict (*l. c.*, p. 168 et surtout 173). — Ces auteurs paraissent s'être rangés à la théorie des transformations *glucosiques* (p. 173), mais avec timidité, avec une notion de leur réalité beaucoup moins nette que dans l'esprit de Chauveau (*Comptes Rendus Acad. Sciences.* 1897).

soit 1 gramme de glucose pour 1<sup>er</sup>,28 de protéiques ; le rapport  $\frac{\text{CO}_2}{\text{O}_2} = 0,77$  abaissera le quotient respiratoire qui, normalement, serait 0,82. Cet abaissement s'observe dans les cas d'une ration riche en protéiques, mais insuffisante pour le travail à effectuer.

Enfin, le glycogène, l'amidon, fixent H<sup>2</sup>O en donnant :



soit 1 gramme de glucose pour 0<sup>er</sup>,90 de l'un d'eux, sans variation du quotient respiratoire.

114. **Discussion de l'isodynamie et de l'isoglucosie.** — Les équations de combustion et de transformation permettent de comparer les équivalents énergétiques des aliments dans les deux doctrines, en prenant le gramme de glucose pour unité, c'est-à-dire 3<sup>Cal</sup>,762 (§ 107). On obtient :

| SUBSTANCES                                  | ISODYNAMIE          | ISOGLUCOSIE         | RAPPORT |
|---|---------------------|---------------------|---------|
| Glucose . . . . .                           | 1 <sup>er</sup> ,00 | 1 <sup>er</sup> ,00 | 1,00    |
| Hydrates de carbone<br>(glycogène, amidon). | 0,89                | 0,90                | 0,99    |
| Protéiques . . . . .                        | 0,792               | 1,28                | 0,62    |
| Graisses (moyenne) . . . .                  | 0,402               | 0,615               | 0,65    |

Les protéiques et les graisses seraient donc *plus producteurs d'énergie* dans l'isodynamie que dans l'isoglucosie, de  $\frac{1}{3}$  de plus en moyenne ; de sorte qu'en les substituant aux hydrates de carbone dans une ration d'entretien, ils seraient insuffisants ou suffisants suivant le point de vue. Chauveau s'assure que, sur un chien qui travaille, l'évaluation isoglucosique est la plus juste, l'autre conduit à une diminution de poids de l'animal (1). D'autre part, les nombreuses expé-

(1) A. Chauveau (*Comptes Rendus Acad. Sciences*, t. CXXV, 1897).

riences d'Atwater sur l'homme ont montré, par exemple, qu'il faut 2.874 Calories pour la dépense dynamique d'un travail équivalent à 522 Calories, la ration étant riche en hydrates de carbone; il en faut 2.907 si la ration est grasse, l'évaluation étant isodynamique. Cette différence de 33 Calories signifie que, pour couvrir sa dépense, l'organisme a transformé des graisses en glucose avec un déchet de 33 Calories. Le déchet s'accroît quand les rations sont de plus en plus pauvres en hydrates de carbone<sup>(1)</sup>, et surtout à mesure que le corps du sujet perd de sa réserve glycogénique; l'intervention de cette réserve peut fausser les calculs dans les cas où la ration contient peu d'hydrocarbonés<sup>(2)</sup>. En général, le foie est un réservoir de glycogène qui alimente les muscles (Claude Bernard), et qui l'alimente aux instants où ces muscles effectuent un travail mécanique. La preuve en est que le quotient respiratoire, voisin de 0,85 dans une alimentation mixte, s'élève quand on travaille.

L'hydrate de carbone apparaît donc avec tous les caractères de combustible préféré des moteurs musculaires; c'est la source unique directe de leur énergie mécanique. En nous rappelant que l'énergie d'une réaction chimique comprend deux termes: l'un, appelé *énergie libre*, est utilisable mécaniquement; l'autre, *énergie liée*, qui se dégrade en chaleur (§ 39), nous considérerons les hydrates de carbone, le glucose, comme de l'énergie libre. Le travail extérieur des muscles, le travail intérieur des organes (dépense minimum d'énergie) utilisent cette forme de combustible.

Lorsque le travail mécanique total est modéré, au point de trouver sa dépense d'énergie libre dans les hydrates de carbone de la ration et de la réserve; ou lorsque le travail extérieur est nul, le sujet n'ayant besoin que de sa dépense d'énergie minimum (celle des organes internes), l'*isodynamie* est souveraine; le calcul des rations se fera exactement d'après les coefficients indiqués plus haut:  $4^{\text{Cal}},10$  —  $4^{\text{Cal}},10$  et  $9^{\text{Cal}},10$ . Mais, au cas de travail excessif, de ration et de réserve pauvres en hydrates de carbone, c'est l'*isoglucosie* qui inter-

(<sup>1</sup>) Atwater et Benedict (*Bull.*, n° 136, p. 184-185; 1903).

(<sup>2</sup>) Atwater et Benedict (*ibid.*, p. 189).

vient, pour combler le déficit, grâce à ses opérations formatrices de glucose (*glycogénétiques*).

Les deux doctrines se complètent et se corrigent; et leur discussion nous enseigne que, pour étudier le moteur animé, il importe de lui fournir toujours *une alimentation suffisante quant aux hydrates de carbone*. La régulation thermique, pour maintenir le corps à température constante, emploie de l'énergie liée, prise indifféremment à l'une des trois substances alimentaires. En un mot, il existe un *minimum hydrocarboné*.

Cette doctrine, défendue ici en 1912, dans ce texte non modifié à dessein, a été reprise en 1919 par Bierry sur la foi d'expériences nouvelles, puis par Bierry et Desgrez <sup>(1)</sup>. Ajoutons que, chez les plantes, là où la respiration est active, le glucose seul est brûlé; les feuilles en sont plus riches que les pétioles <sup>(2)</sup>. Enfin, Anderson et Graham Lusk ont reconnu dans les hydrates de carbone des aliments de *travail* utilisés sans perte <sup>(3)</sup>.

Rubner <sup>(4)</sup> a fait des expériences très curieuses en supprimant la régulation par le maintien d'un animal dans un milieu à 37°, et après l'avoir débarrassé de ses réserves glycogéniques à la suite d'un jeûne prolongé. Alors il observe que si l'animal au repos dépense 100 calories d'hydrate de carbone pour son entretien (travail intérieur), cette dépense physiologique, avec les graisses, sera augmentée de 13 calories aux dépens du corps; elle sera de 131 calories si la ration est protéique.

Ainsi, comme *dépense physiologique minimum*, on aura :

Pour 100 calories d'hydrates de carbone, 100 calories d'énergie libre.

Pour 100 calories de graisse, 13 calories d'énergie liée et 87 calories d'énergie libre.

<sup>(1)</sup> H. Bierry (*Comptes Rendus* 1919, t. CLXIX, p. 197); — *Id.*, et Desgrez (*Ibid.* 1920, t. LCXXI, p. 1393).

<sup>(2)</sup> H. Colin (*Comptes rendus* 1919, t. LCVIII, p. 697).

<sup>(3)</sup> *Proceed. America* III, p. 386; mai 1917.

<sup>(4)</sup> Max Rubner. *Die Gesetze des Energieverbrauchs bei der Ernährung* p. 334 et les chap. xvii et xviii, Leipzig, 1902.

Pour 100 calories de protéiques, 31 calories d'énergie liée et 69 calories d'énergie libre.

Le déchet est donc nul dans le premier cas, ou sensiblement (il serait tout à fait nul dans une ration glucosique). Il s'ensuit que la dépense de 100 calories d'énergie libre ou hydrocarbonée correspond à

$$\frac{100 \times 100}{87} = 115 \text{ calories four-}$$

nies en graisses, et  $\frac{100 \times 100}{69} = 145$  calories en protéiques.

Rubner a appelé *Actions spécifiques dynamiques* ces gaspillages respectivement égaux à  $\frac{15}{100}$  et  $\frac{45}{100}$ . Nous voyons déjà que le travail utilise la forme d'énergie la plus économique.

G. Weiss (1) précise cette conclusion : au lieu de l'homme il prend un animal qui ne règle pas, normalement, sa température : la grenouille, puis, l'alimentant avec du glucose, du beurre ou de la viande maigre, il mesure sa consommation d'oxygène. Il obtient, dans l'ordre ci-dessus, les proportions suivantes :

100

107

153

qui rappellent les actions spécifiques dynamiques de Rubner.

Sur l'homme, Atwater et Benedict (2) trouvent que la consommation d'oxygène à jeun (on vit, dans ce cas, sur ses réserves de graisses) est de 30<sup>gr</sup>,79 pour produire 100 Calories; elle est de 28<sup>gr</sup>,88 avec une ration contenant 75 0/0 d'hydrocarbonés; ce sont des proportions de 100 et 107. Le cas des protéiques n'a pas été envisagé par suite de la difficulté de faire dépenser des protéiques purs avant que les graisses et hydrocarbonés des réserves soient épuisés. Mais tous les expérimentateurs ont reconnu que l'excès de protéiques entraîne un excès d'absorption d'oxygène, et Chauveau a pu résumer les faits en écrivant : « La digestion des aliments entraîne une surconsommation d'oxygène, indicative d'un accroissement de la dépense énergétique de l'économie animale : accroissement faible avec les hydrates de

(1) G. Weiss (*Journ. de Physiologie*, 1910, p. 408; *Rev. gén. Sc.*, 1910, p. 49).

(2) Atwater et Benedict (*Bull.*, n° 136, p. 167; 1903).

carbone, plus accentué avec les graisses, et marqué, avec les albuminoïdes, au coin d'une indéniable et écrasante supériorité » (1).

115. **Variations de la dépense.** — Si la *nature* de l'alimentation influe sur la grandeur de la dépense, il est des causes de variations encore plus importantes :

1° *La grandeur du travail mécanique.* — Cela est évident, et nous l'analyserons bientôt complètement.

2° *La masse du corps.* — Cette masse a pour dimension  $r^3$ , tandis que la *surface* du corps a pour dimension  $r^2$ ; les petites tailles ont donc une surface relative trop grande; et comme le rayonnement croît avec cette surface, la chaleur de régulation suivra la même loi. Il s'ensuit, pour les petites tailles, une nécessité de régler plus activement leur température et d'avoir des combustions plus intenses. C'est ce qu'on a appelé « la Loi des surfaces ». — On peut en conclure que, par kilogramme de son poids, l'enfant dépense plus que l'adulte. Ci-contre un tableau comparatif, dans lequel on a compris des sujets spéciaux ayant une masse musculaire insuffisante relativement à leur surface (obèses) ou bien un excès de cette surface (gens très maigres); ils sont pris au repos.

Tous les sujets considérés sont du *sexe mâle* et âgés de trente ans à quelques semaines. Chez les vieillards, entre soixante-neuf et quatre-vingt-quatre ans, on trouve une dépense moyenne de 28 Calories par kilogramme ou 910 Calories par mètre carré (2). Et dans l'autre sexe, on peut dire que la dépense est généralement les  $\frac{96}{100}$  de ce qu'elle est chez l'homme, à poids et âge égaux (3). Nous l'avons vérifié sur les adultes; on donne 94 0/0 dans le cas des enfants (4).

3° *Le milieu extérieur.* — A surface égale, les corps rayonnent d'autant plus que le milieu est plus froid, et conséquemment ils dépensent en proportion pour compenser cette déperdition: c'est là une *régulation chimique* (Rubner);

(1) A. Chauveau (*Compt. Rend. Acad. Sc.*, 28 janvier 1907, p. 173); — Cf. Laulanié, *Elements de physiol.*, 1905, p. 561; — J. Amar (*Journ. de Physiol.*, 1912, p. 307); — Lafon (*C. R. Sc.*, mars-avril 1913).

(2) Sondén (*Skand. Arch. f. Physiol.*, t. XI, p. 60; 1900).

(3) Magnus-Lévy et Falk (*loc. cit.*); Sondén et Tiegerstedt (*loc. cit.*).

(4) Benedict et Talbot (Publication 302, p. 206; Washington, 1921).

au delà d'une température du milieu égale à celle du corps, ils ne peuvent pas réduire leur dépense, puisqu'ils sont, dans ce cas, sous la loi de la *dépense physiologique minimum*; ils souffrent donc de la chaleur qu'ils produisent et s'en défendent par une vaporisation active (voir ci-dessus, § 110), pulmonaire et cutanée; c'est la *régulation physique* de Rubner<sup>(1)</sup>. Leur sensibilité révèle l'action *des centres nerveux*.

| POIDS<br>du<br>CORPS | DEPENSE EN 24 H.    |                               | AUTEURS                     | OBSERVATIONS   |
|----------------------|---------------------|-------------------------------|-----------------------------|--|
|                      | Par<br>kilogramme   | Par metre carre<br>de surface |                             |  |
| 109 <sup>h</sup> ,00 | 19 <sup>C</sup> ,75 | 762 <sup>C</sup>              | Magnus Lévy <sup>(1)</sup>  | Sujet à jeun.  |
| 83,00                | 25,40               | 882                           | —                           | —  |
| 77,00                | 31,64               | 1.084,80                      | Atwater <sup>(2)</sup>      | Sujets alimentés et dans un calorimètre à 20°.           |
| 70,00                | 32,64               | 1.092,00                      |                             |  |
| 65,00                | 32,88               | 1.072,80                      | Rubner <sup>(3)</sup>       | Sujets au régime libre.                                  |
| 65,00                | 36,25               | 1.100,00                      |                             |  |
| 59,4                 | 37,70               | 1.200                         | Amar                        | —  |
| 52,8                 | 39,80               | 1.220                         | Camerer                     | ( <i>Der Stoffwechsel des Kindes</i> , p. 108; 1894).    |
| 41,0                 | 44,00               | 1.324                         | Rubner                      | ( <i>Beiträge z. Ern. im Knabenalter</i> , Berlin 1902). |
| 38,3                 | 48,00               | 1.254                         | Sonden<br>et<br>Tiegerstedt | ( <i>Skand. Arch. f. physiol.</i> ; p. 215, t. 6; 1895). |
| 34,0                 | 47,40               | 1.250                         | Camerer                     | <i>Loc. cit.</i>   |
| 32,40                | 56,00               | 1.394                         | Sonden<br>et Tiegerstedt    | <i>Loc. cit.</i>   |
| 26,00                | 52,00               | 1.290                         | Rubner                      | <i>Loc. cit.</i>   |
| 23,20                | 63,00               | 1.499                         | Hellström                   | —  |
| 18,00                | 76,70               | 1.680                         | Camerer                     | <i>Loc. cit.</i>   |
| 15,20                | 79,00               | 1.747                         | Uffelmann                   | ( <i>Die Hygiene des Kindes</i> , p. 260).               |
| 12,20                | 81,00               | 1.568                         | Heubner<br>et Rubner        | Moyenne ( <i>Zeitsch. f. Biol.</i> , t. 36 et 38).       |
| 7,60                 | 75,00               | 1.251                         | Camerer                     | <i>Loc. cit.</i>   |
| 5,60                 | 79,00               | 1.170                         | —                           | —  |
| 4,40                 | 100,00              | 1.370                         | —                           | —  |
| 3,20                 | 81,00               | 1.000                         | —                           | —  |

(1) Magnus Lévy et Falk (*Arch. f. anat. und phys.*, suppl., p. 314; 1899).  
(2) *Bull.*, n° 136, p. 148; 1903.  
(3) Rubner (*Zeitsch. f. Biol.*, t. XXI, tableau 12, p. 393; 1885); J. Amar, *le Rendement*, etc..

(1) Rubner: *Die Gesetze...* (*loc., cit.* ch. VIII). — *Kraft und Stoff im Haushalte der Natur.*, p. 78, Leipzig, 1909 (petit ouvrage intéressant).

**116. Adaptation de l'intensité respiratoire à la dépense.** — Les variations de la dépense, c'est-à-dire du combustible, entraînent des variations égales du comburant : l'oxygène ; et les poumons sont traversés par un courant plus ou moins rapide d'air ; le *nombre de respirations* se modifie (voir § 149). C'est ainsi qu'il faut au charbon, placé sur la grille d'un foyer, un « tirage » de cheminée suffisant ; mais ce tirage, dans nos machines industrielles, n'a pas assez de jeu pour s'adapter à toute espèce de combustible. Même les « valves d'admission », qui règlent l'alimentation, n'ont pas toute la souplesse désirable. — Au contraire, chez l'homme et l'animal, l'admission du comburant est parfaitement réglée, et s'adapte rigoureusement aux nécessités de la dépense, pour une qualité quelconque d'aliment. Et l'air circule dans la cheminée respiratoire dont la forme multiplie les surfaces de contact de l'oxygène avec le sang. Le travail des muscles respirateurs s'accroît dans le cas d'une dépense élevée (état dynamique), et retentit évidemment sur la valeur de cette dépense ; il figure au budget de l'organisme. Comme nous l'avons dit maintes fois, tous les réglages de la machine vivante sont assurés par des *centres nerveux* ; le centre respirateur a son siège dans le *bulbe*, sans préjudice du contrôle général du cerveau.

**117. Conclusions de ce livre.** — Le combustible du moteur humain doit renfermer une proportion de 1 gramme de protéiques par kilogramme de poids du corps, et assez d'hydrates de carbone pour suffire au travail musculaire (externe et interne) ; mais, pour la régulation de la température, la lutte contre le froid, la nature du combustible est indifférente. Cependant on remarquera que les graisses, à poids égal, sont les plus exothermiques :  $9^{\text{Cal}},40$  par gramme de réserve, contre  $4^{\text{Cal}},15$  et  $4^{\text{Cal}},40$  (§ 100) ; elles sont donc économiques ; l'expérience a, d'ailleurs, montré que l'organisme les choisit pour sa *thermogénèse* (voir § 178). Quant aux variations du quotient respiratoire et de la consommation d'oxygène en fonction du travail et de l'alimentation, nous les résumerons dans le tableau ci-dessous (1). Nous

(1) Atwater et Benedict (*Bull.*, n° 136, p. 467, tableau 97 : 1083).

calculerons la dépense, d'après le volume de comburant, à raison de  $4^{\text{Cal}},90$  par litre mesuré à  $0^{\circ}$  et 760 millimètres, l'alimentation étant *mixte*; si l'alimentation est *pure* (une seule espèce immédiate), on se servira du tableau de la page 208, et dans le cas du jeûne on adoptera la valeur moyenne de  $4^{\text{Cal}},60$  par litre d'oxygène.

Il y a, enfin, une question de *qualité* chimique, ou physiologique dans le choix de la ration. Par les *minimums protéique et hydrocarboné*, par un apport suffisant en *vitamines*, elle assurera la croissance, le bon entretien et le fonctionnement normal de l'organisme.

## EXPÉRIENCES DE 24 HEURES SUR UN SUJET ADULTE

| TYPES D'EXPERIENCES |  | ENERGIE<br>MESURÉE | OXYGENE<br>CONSOMME  | QUOTIENT<br>RESPIRA-<br>TOIRE | CALORIES<br>PAR LITRE<br>d'oxygène |
|---------------------|--|--------------------|----------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| Repos               | Jeûne (reserves de graisses).....                      | 2.197 Cal.         | 473 <sup>1</sup> ,60 | 0,727                         | 4 <sup>C</sup> ,638(1)             |
|                     | Ration avec près de 50 0/0 d'hydrates de carbone.....  | 2.287              | 469,40               | 0,862                         | 4,872                              |
|                     | Ration avec 50 à 60 0/0 d'hydrates de carbone.....     | 2.227              | 453,60               | 0,887                         | 4,909 (2)                          |
|                     | Ration avec 73 à 76 0/0 d'hydrates de carbone.....     | 2.175              | 439,80               | 0,937                         | 4,945                              |
| Travail             | Ration riche en graisses.....                          | 3.570              | 737,50               | 0,833                         | 4,840                              |
|                     | Ration riche en hydrates de carbone.....               | 5.128              | 1.058,90             | 0,809                         | 4,842                              |
|                     | Ration insuffisante (donc réserves grasses utilisées). | 3.699              | 757,10               | 0,865                         | 4,885                              |
|                     |  | 5.142              | 1.025,90             | 0,906                         | 5,012                              |
|                     |  | 9.314              | 2.032,40             | 0,770                         | 4,582 (1)                          |

(1) On déduit de ces chiffres une moyenne de  $4^{\text{Cal}},60$ .

(2) C'est la valeur qui correspond à notre ration normale, dans la vie courante (voir § 110).



## LIVRE III

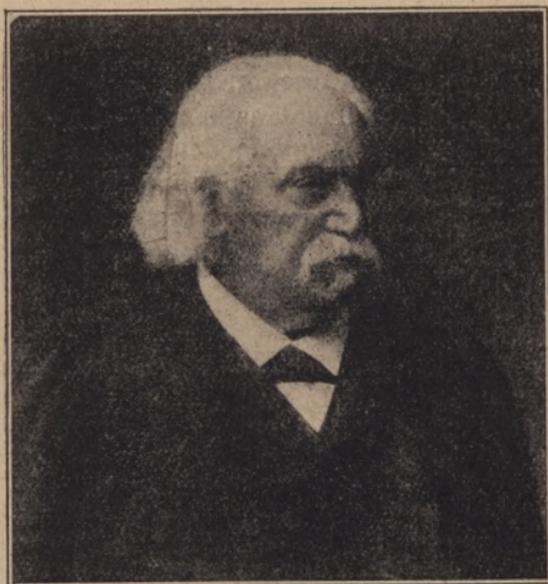
# L'ÉNERGIE HUMAINE

### CHAPITRE I

#### LOIS DE LA DÉPENSE ÉNERGÉTIQUE

118. **Généralités.** — Au point de vue de son utilité, la dépense énergétique de l'homme est celle-là seule qui correspond à l'activité musculaire ; mais, dans un certain nombre de circonstances,

les muscles demeurent *contractés* sans effectuer de travail, au sens mécanique de ce mot ; l'effort statique ainsi dépensé entraîne une consommation d'énergie, puisqu'on peut l'assimiler à un travail de frottement (§ 62) ou travail vibratoire (§ 93). Mais la contraction développe



J.-B.-A. Chauveau de l'Institut (1827-1917).

plus ou moins de force ; dynamiquement elle a des degrés variables de vitesse, de durée, et son résultat visible c'est la *fatigue*, elle-même susceptible de degrés. Si, pourtant, nous ne considérons que les modes d'activité n'amenant pas

la fatigue excessive, ne « forçant » pas les muscles, il nous serait loisible d'évaluer la grandeur du travail d'après la grandeur de la dépense d'énergie. Celle-ci augmentera avec celui-là. Nous lirions, dans les variations de la dépense, l'effet de tel ou tel facteur dynamique : force, vitesse, alors que la quantité de travail serait demeurée constante. Mais on n'oubliera pas combien la *nature de l'aliment* modifie, elle aussi, la valeur de la dépense, et l'on observera un *type d'alimentation invariable*, ou encore on opérera sur des sujets pris à la suite d'un jeûne suffisant.

Les lois du fonctionnement de la machine humaine ont été découvertes et analysées sur cette base par Chauveau. L'illustre savant y consacra environ vingt ans ; c'est une œuvre scientifique de très haute valeur et d'une importance pratique de premier ordre. Elle doit être le point de départ des études sur le *travail professionnel*.

**119. Lois du fonctionnement musculaire** <sup>(1)</sup>. — I. *Effort statique*. — La contraction des muscles, qu'elle soit répétée, périodique, comme dans le *travail*, — ou soutenue et de nature vibratoire, comme dans l'*effort statique*, est préparée par le « travail physiologique » intérieur. Elle s'accompagne d'une dépense absolument nécessaire. Le fait de porter un haltère à bras tendu et immobile, ou de le lever et l'abaisser plusieurs fois, entraîne une dépense d'énergie.

Relativement à l'effort statique, Chauveau vérifie l'expression trouvée plus haut (§ 87) :

$$F = P (1 + r),$$

à savoir que la dépense est, comme cet effort  $F$ , et dans le même temps :

1° Proportionnelle à la charge soulevée  $P$  ;

2° Proportionnelle au degré de raccourcissement  $r$ .

L'absence de travail mécanique entraîne la dégradation en *chaleur* de toute l'énergie dépensée. Donc, l'effort statique a pour résultat unique la production de chaleur, ce qui élève la *température* des muscles contractés. Exemples <sup>(2)</sup> :

(1) Consulter G. Weiss, *Travail musculaire et chaleur animale*, 1909, Paris, Masson.

(2) A. Chauveau (*Journal de Physiologie*, 1899, p. 157; 1900, p. 313).

a) On souève une *charge variable*, en raccourcissant les muscles *biceps* d'une même quantité. La température s'élève des quantités suivantes :

|                    |            |        |        |       |
|--------------------|------------|--------|--------|-------|
| Poids soulevé..... | 1 kgs.     | 2 kgs. | 5 kgs. |       |
| Echauffement       | en 2'..... | 0°,17  | 0°,32  | 0°,98 |
|                    | en 4'..... | 0°,25  | 0°,58  | 1°,15 |

La proportionnalité des excès de température aux poids et à la durée n'est pas douteuse, malgré la difficulté des mesures (thermomètre appliqué sur les muscles et donnant le  $\frac{1}{100}$  de degré).

b) On soutient un poids constant de 2 kilogrammes (P, fig. 135) en donnant à l'avant-bras des angles de flexion variant de  $-40^\circ$  à  $+40^\circ$ . La durée de soutien étant de deux minutes, on a trouvé :

|               |             |             |           |             |             |
|---------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| Angles.....   | $-40^\circ$ | $-20^\circ$ | $0^\circ$ | $+20^\circ$ | $+40^\circ$ |
| Echauffement. | 0°,28       | 0°,50       | 0°,67     | 0°,78       | 0,88        |

Au lieu de l'élévation de température, considérons la dépense d'oxygène (1); nous aurons :

a) Soutien d'une charge variable pendant deux minutes :

|              |   |   |                   |
|--------------|---|---|-------------------|
| Charge.....  | 1 <sup>kg</sup> , <sup>2</sup> / <sub>3</sub> | 3 <sup>kg</sup> , <sup>1</sup> / <sub>3</sub> | 5 kg.             |
| Oxygène..... | 119 <sup>cc</sup>                             | 204 <sup>cc</sup>                             | 319 <sup>cc</sup> |

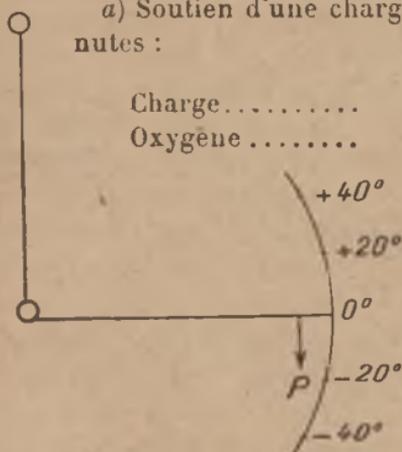


FIG. 135.

C'est une assez exacte proportionnalité ; l'oxygène représente, ici, la *différence* entre la consommation pendant l'effort statique et la consommation avant l'expérience (repos). On pourrait l'évaluer en calories à raison de 4<sup>Cal</sup>,60 par litre, l'homme étudié

se trouvant à jeun ; on aurait : 0<sup>Cal</sup>,547 ; 0<sup>Cal</sup>,938 et 1<sup>Cal</sup>,467.

(1) A. Chauveau et Tissot (*Comptes Rendus Sciences*, t. CXXIII, p. 1236 ; 1896, et *Arch. de Physiol.*, 1897, p. 78).

b) Pour un effort de 5 kilogrammes et des angles de flexion variables, on a :

|                    |                   |                   |                   |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Angles.....        | — 20°             | 0                 | + 20°             |
| Oxygène en excès.. | 212 <sup>cc</sup> | 344 <sup>cc</sup> | 360 <sup>cc</sup> |

La position des muscles (puissances) sur le levier qui reçoit la charge, le nombre de muscles qui interviennent dans un même effort statique, et même leur fonction (1), modifient la dépense; mais, toutes choses égales, celle-ci est bien proportionnelle à la *charge statique et à la durée d'action*. Nous écrirons, en général :

$$D_s = K \times P (1 + r),$$

$D_s$ , étant la dépense *stricte* de l'effort statique (excès sur la dépense au repos),  $K$  un coefficient de proportionnalité (2).

Du point de vue utilitaire, toute la dépense statique est stérile; elle se dissipe en chaleur, comme le frottement dans un frein Prony qui équilibre une charge, un poids, une force.

Mais la production d'efforts statiques est parfois nécessaire dans le maniement des outils, le soutien d'un ouvrage, l'exercice d'un sport (lutte, etc.).

Pourrait-on, dans ces cas, parler de *rendement* ?

Il y a bien un travail intérieur, moléculaire, se traduisant par l'effort d'un côté, la chaleur dépensée, ou l'oxygène consommé, de l'autre. Mais comment évaluer le rendement ?

Il n'y a qu'une méthode. Elle consiste à rapporter la dépense au nombre de kilogrammes d'efforts; le prix de l'unité *statique* sera le rendement.

Il est clair, comme nous allons le voir, que la *vitesse d'action de l'effort* en modifie le prix; elle doit *l'augmenter*, mais

(1) H. Bürker (*Arch. ges. Physiol.*, 1919, t. CLXXIV, p. 282).

(2) Toutes réserves doivent être faites sur la technique de Bornstein et Poher qui ont obtenu une croissance plus rapide de la dépense d'effort statique (*Pflüg. Arch.*, t. XCV, p. 146; 1903); de même Bornstein et Gærtzen, B. et Ott (*Ibid.*, t. CIX; 1905).

par contre la durée diminue, et en définitive la vitesse est un facteur d'économie.

120. II. *Contraction dynamique : travail.* — Déplaçons une charge; le travail des muscles pourra être *moteur* (cas le plus fréquent) ou *resistant* (chute réfrénée); si nous appelons  $D_d$  la *dépense dynamique*, elle sera relative à l'effort statique  $D_s$  et au travail effectué  $\bar{c}$ . Chauveau est ainsi conduit à poser l'équation :

$$D_d = D_s + \bar{c},$$

ces termes étant traduits en calories, par exemple.

Et il remarque que la dépense équivalente à  $\bar{c}$  comprend la valeur  $P \times h$  du travail mécanique (poids soulevé à une hauteur ou abaissé d'une hauteur  $h$ ), et la valeur des frottements  $R$  qui s'opposent au « démarrage » des muscles; elle comprend enfin une fraction  $V$  qui couvre les frais de la vitesse de marche. L'équation serait donc :

$$D_d = D_s + \bar{c} = D_s + Ph + R + V.$$

Or le terme  $R$ , qui équivaut aux résistances passives, est déjà *supposé*, compris dans la *contraction statique*, et d'autre part dans la dépense de la vitesse. Ce terme  $R$  figure donc deux fois dans la dépense  $D_d$ : à savoir dans  $D_s$  et dans  $V$ . Les valeurs exactes à considérer seront, en définitive :

$$D_d = (D_s - R) + Ph + R + (V - R).$$

Ce qui revient à :

$$(1) \quad D_d = D_s + Ph + V - R.$$

Telle est la « formule de Chauveau » (1) donnant l'analyse de la dépense pour un travail  $Ph$ .

On exprimera toutes ces valeurs en calories ou en litres d'oxygène, ou en kilogrammètres, c'est-à-dire toujours au moyen d'une seule unité.

(1) A. Chauveau (*Comptes Rendus Sciences*, 1902, t. CXXXIV, p. 1266).

121. **Démonstration de la formule de Chauveau.** — Rame-née ainsi à quatre termes, la formule de Chauveau ne peut pas se démontrer expérimentalement, dans le cas des muscles, car ses termes ne sont pas dissociables. Mais, sur les moteurs inanimés, M. Weiss et Chauveau ont fourni cette démonstration.

Soit un *moteur électrique*. Un poids de 10 kilogrammes est soulevé en 1 seconde à la hauteur de 2<sup>cm</sup>,50. On dépense, à cet effet, 17,50 watts (1), d'après l'expérience.

Or

$$Ph = 10 \times 0,025 = 0^{\text{kgm}},250 = 2,45 \text{ watts.}$$

La dépense de l'électro-aimant pour l'amener au point de pouvoir déplacer le poids atteint 8,50 *watts*; c'est  $D_s$ .

A la vitesse de 2<sup>cm</sup>,50, le moteur à vide consomme 11 *watts* = V.

Enfin le démarrage à vide coûte : R = 4,50 *watts*. Donc :

$$D_d = 8,50 + 2,45 + 11 - 4,50 = 17,45 \text{ watts.}$$

Ce qui vérifie la formule (2).

Soit, de même, un *moteur hydraulique*. Le démarrage pourra être négligé. Et l'on obtient pour soulever de 10 centimètres un poids de 10 kilogrammes, à la vitesse de 0<sup>m</sup>,001, une dépense  $D_d = 63,01$ . En calculant les termes  $D_s$ , Ph et V séparément, on a trouvé au total 62,66. C'est une vérification suffisante (3). Mais aussi bien celle-ci que celle-là ne concernent que la dépense dans un travail *positif* ou *moteur*. Rien de précis n'a été fait au sujet du travail *négatif* ou *résistant*. Si l'on considère simplement le changement de *signe* du travail Ph, on devra écrire :

$$(2) \quad D'_d = D_s - Ph + V - R.$$

(1) Rappelons que le watt (unité de puissance) vaut 0<sup>kgm</sup>,102 environ.

(2) A. Chauveau (*Journal de Physiologie*, 1901).

(3) G. Weiss (*Comptes Rendus Biologie*, 1903, p. 426).

C'est-à-dire que non seulement on ne fait pas les frais du travail  $Ph$ , mais encore on réalise une sorte de recette provenant de ce travail. On dit que le *travail résistant rapporte de l'énergie*. Cette restitution est conforme à la loi d'équivalence (§ 36). Le muscle, en résistant à la production d'un travail, détruit de la force vive; il la dégrade en chaleur; *mais cela ne veut point dire que, dans un travail résistant, on récupère de l'énergie utile*. La variation d'énergie ou la dépense du muscle doit s'exprimer par :

$$U = Q - \bar{c}, \quad \text{ou} \quad D'_d = D_s - Ph + V - R.$$

Chauveau <sup>(1)</sup>, après Hirn <sup>(2)</sup>, s'assure que la *restitution calorifique a lieu*. En effet un homme s'élève sur un treuil de carriers placé dans un calorimètre; sa dépense, d'après l'oxygène consommé, atteint 257 Calories pour un travail de 68 Calories; et l'on enregistre au calorimètre 193 Calories. Donc, dans ce travail moteur, on a :

$$D_d = 193 + 68 = 261 \text{ Calories,}$$

en harmonie avec la dépense mesurée.

En descendant sur le treuil, aux mêmes conditions de vitesse, l'homme dépense 125 Calories, et l'on enregistre au calorimètre 164 Calories. Écrivons :

$$U = Q - \bar{c} \quad \text{ou} \quad 125 = 164 - 68 (= 96 \text{ Calories}),$$

nous voyons que de la chaleur a été restituée certainement, mais en quantité insuffisante. La vérification laisse à désirer, bien que le principe de la conservation de l'énergie soit démontré. Du reste le savant physiologiste admet quelques causes d'erreur dans l'expérience. La dépense énergétique

(1) A. Chauveau (*Comptes Rendus Acad. Sciences*, 1899, 2<sup>e</sup> sem., p. 249).

(2) A. Hirn, *Recherches sur l'Equivalent mec. de la chaleur*. Colmar, 1858.

se montre *plus faible* dans le travail résistant que dans le travail moteur; les muscles *s'échauffent moins* (1), la respiration est moins intense; la chronophotographie montre un relief musculaire peu marqué (Richer).

La dépense plus faible du travail résistant s'explique par ce fait que le muscle fournit un effort réellement inférieur à l'effort moteur, et cela en vue de transformer le mouvement accéléré du corps soumis à la pesanteur en un mouvement à vitesse uniforme.

En chute *libre*, il n'y aurait point de dépense. Le terme V de la formule de Chauveau est donc d'autant plus faible que la chute est plus rapide. De toutes façons, sur l'énergie libre du moteur, on réalise une économie notable. On l'a évaluée à 30-35 0/0 sur les tramways électriques (2).

122. Étude approfondie de la formule de Chauveau; ses résultats pratiques. — Chauveau étudia les effets de la *vitesse* et de l'*effort* sur la dépense énergétique (3). Un homme du poids de 50 kilogrammes s'élève sur la roue à chevilles à une vitesse de 431 mètres à l'heure. On maintient cette vitesse constante et on charge le sujet de poids progressant par 10 kilogrammes, afin de modifier son effort d'ascension. On obtient *par heure* :

| POIDS<br>DU SUJET | DÉPENSE<br>D'OXYGÈNE   | DÉPENSE<br>PAR KILOGRAMMÈTRE          |
|-------------------|------------------------|---------------------------------------|
| 50 kg.            | 53.700 cm <sup>3</sup> | 2 <sup>cm</sup> 3,49    0 Cal, 011454 |
| 60                | 63.550                 | 2 ,45 ou 0 ,011270                    |
| 70                | 82.650                 | 2 ,73    0 ,012558                    |

La dépense *minimum* correspond ici au poids de 60 kilogrammes.

Si nous laissons la charge constante (50 kilogrammes) pour

(1) A. Chauveau (*Comptes Rendus Sciences*, 1895, t. CXXI, p. 26).

(2) Lang (*Electrical Word* du 30 mars 1911).

(3) A. Chauveau (*Comptes Rendus Sciences*, 1904, 1<sup>er</sup> sem., p. 194).

faire varier la seule vitesse, nous aurons :

| VITESSE<br>HORAIRE | DÉPENSE<br>D'OXYGÈNE   | DÉPENSE<br>PAR KILOGRAMMETRE |              |
|--------------------|------------------------|------------------------------|--------------|
|                    |                        |                              |              |
| 302 m.             | 44.900 cm <sup>3</sup> | 2 <sup>cm</sup> 3,97         | 0Cal,013662  |
| 431                | 53.400                 | 2 ,47                        | ou 0 ,011362 |
| 554                | 60.300                 | 2 ,17                        | 0 ,009982    |

L'économie augmente donc avec la vitesse. Et ce qui s'observe ici quand le travail est moteur se retrouve dans le cas d'un travail résistant exactement symétrique. La *dépense par kilogramme* sera :

|                                |                      |                      |                      |
|--------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| { Avec poids croissant.....    | 1 <sup>cm</sup> 3,41 | 1 <sup>cm</sup> 3,21 | 1 <sup>cm</sup> 3,47 |
| { Avec vitesse croissante..... | 1 ,68                | 1 ,32                | 1 ,12                |

En comparant les travaux moteur et résistant, on observe que ce dernier bénéficie plus que l'autre des effets de la vitesse. Inversement, si on ralentit peu à peu le mouvement, il pourra y avoir une valeur de la vitesse telle que la *dépense* sera presque la même, que l'on monte ou que l'on descende, par exemple sur un escalier. Ainsi, un homme de 70 kilogrammes a donné les résultats suivants<sup>(1)</sup> :

| VITESSE<br>HORAIRE   | DÉPENSE PAR KILOGRAMMETRE |                      | RAPPORT |
|----------------------|---------------------------|----------------------|---------|
|                      | TRAVAIL MOTEUR            | TRAVAIL RÉSIDANT     |         |
| 136 <sup>m</sup> ,80 | 4 <sup>cm</sup> 3,30      | 3 <sup>cm</sup> 3,32 | 1,29    |
| 176 ,50              | 3 ,76                     | 2 ,18                | 1,72    |
| 248 ,70              | 3 ,70                     | 1 ,82                | 2,03    |

La progression de la dépense est telle que travail moteur et travail résistant coûteraient autant à l'organisme pour une vitesse de 100 mètres à l'heure environ.

(1) A. Chauveau (*Comptes Rendus Sciences*, t. CXXII ; 1896).

Il est donc hors de doute que la *vitesse est un facteur d'économie extrêmement important*. L'ouvrier travaillant le plus vite dépensera le moins. La charge ou l'effort agit d'une manière tout à fait inverse; elle élève la dépense; elle n'est pas un facteur d'économie, ce serait plutôt une cause de gaspillage.

123. Analyse de la formule de Chauveau. — Réduisant sa formule à trois termes :

$$D_d = D, + Ph + V,$$

ce qui est suffisant pour une première approximation, Chauveau s'efforce de l'analyser expérimentalement (1). Au moyen d'un dispositif ingénieux, il fait *travailler le bras* de manière à soulever des poids différents, à hauteurs et à vitesses variables, la contraction qui souleve étant suivie d'une *detente à vide*.

1° *Étude de D.* — On *soutient* des poids croissants en contractant les muscles fléchisseurs 13 fois par minute; il n'y a pas de travail produit. On trouve :

|                        |                      |                    |                      |                     |
|------------------------|----------------------|--------------------|----------------------|---------------------|
| Poids soutenu.....     | 1 <sup>kg</sup> ,500 | 3 kg.              | 4 <sup>kg</sup> ,500 | 6 kg.               |
| Dépense d'oxygène..... | 40 cm <sup>3</sup>   | 79 cm <sup>3</sup> | 133 cm <sup>3</sup>  | 197 cm <sup>3</sup> |

Le même soutien serait plus onéreux si le nombre de contractions ou — ce qui est identique — le *nombre d'excitations fournies par les nerfs* augmentait. Ainsi :

|  |                    |                    |                    |                    |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Contractions.....                      | 13                 | 26                 | 39                 | 52                 |
| Dépense d'oxy- ( 1 <sup>kg</sup> ,500. | 36 cm <sup>3</sup> | 44 cm <sup>3</sup> | 63 cm <sup>3</sup> | 76 cm <sup>3</sup> |
| gene pour .. / 4 ,500.                 | 98                 | 125                | 163                | 187                |

Ce résultat est très intéressant; il montre que la fréquence des démarrages ou des *mises en train* est une cause d'aggravation de la dépense. Du reste les ingénieurs l'ont depuis longtemps constaté dans la marche des trains et des tramways. On ne peut donc pas méconnaître ce fait, jusque-là insoupçonné, que l'action du nerf sur le muscle nécessite une certaine consommation d'énergie, et cela d'autant plus que l'effort à produire est plus grand. Les fardeaux *trop lourds* manifestent ainsi, sous un autre aspect, le gaspillage dont ils sont l'origine par une mise en train plus onéreuse.

2° *Étude de Ph + V.* — C'est ici le *travail* même, travail estimé en quantité (Ph) et en qualité (V). Chauveau modifie Ph, laissant  $h = 4^m,42$  constante et aussi la vitesse, tandis que P passe

(1) A. Chauveau (*Comptes Rendus Sciences*, 1904, t. CXXXVIII, juin-juillet).

de 1<sup>kg</sup>,500 à 6 kilogrammes. Par 13 contractions en 1 minute, on soulève le poids à 4<sup>m</sup>,42, soit de 0<sup>m</sup>,34 par contraction des muscles fléchisseurs. On mesure, dans ces conditions, la dépense  $D_c$ . Connaissant  $D_d$ , on en déduit  $Ph + V$ .

| POIDS DÉPLACÉ        | $D_d$              | $D_c$ (1)          | $Ph + V$                |
|----------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|
| 1 <sup>kg</sup> ,500 | 99 cm <sup>3</sup> | 40 cm <sup>3</sup> | 59 cm <sup>3</sup> 1,00 |
| 3,000                | 158                | 79                 | 79 ou 1,34              |
| 4,500                | 241                | 133                | 108 1,83                |
| 6,000                | 324                | 197                | 127 2,15                |

(1)  $D_c$  est emprunté aux tableaux précédents (p. 244).

Les variations de  $Ph + V$  sont *moins rapides* que celles du poids soulevé; celles de  $D_d$  suivent à peu près l'accroissement du poids. C'est donc l'*effort statique*  $D_c$ , qui se fait le plus sentir dans la dépense.

Prenons maintenant un poids constant, soit 1<sup>kg</sup>,500, et, en augmentant le nombre de contractions, portons-le à 4<sup>m</sup>,42; 8<sup>m</sup>,84; 13<sup>m</sup>,26 et 17<sup>m</sup>,68, dans le même temps. La vitesse augmentera donc comme 1, 2, 3, 4, ainsi que le travail. Nous trouvons :

| CONTRACTIONS | $D_d$              | $D_c$ (1)          | $Ph + V$                |
|--------------|--------------------|--------------------|-------------------------|
| 13           | 91 cm <sup>3</sup> | 36 cm <sup>3</sup> | 55 cm <sup>3</sup> 1,00 |
| 26           | 151                | 44                 | 107 ou 1,94             |
| 39           | 199                | 63                 | 136 2,47                |
| 52           | 243                | 76                 | 167 3,03                |

(1)  $D_c$  est emprunté aux tableaux précédents (p. 244).

Comme il était facile de le prévoir, les *reprises* ont augmenté la dépense qui les concerne proprement, mais il y a une *économie* dans la dépense totale, vu que le même travail est produit avec une faible charge et une grande vitesse, au lieu que précédemment c'était une lourde charge et une faible vitesse. Cette constatation est d'une grande utilité pratique; elle apprend qu'il faut *fractionner* les charges, et compenser ce fractionnement par une accélération convenable.

Exemple : Il s'agit de transporter à un sixième étage, situé à

17<sup>m</sup>,60, un fardeau de 6 kilogrammes :

Si on l'y portait en une seule fois, on  
dépenserait.....  $324^{cm3} \times 4 = 1.296^{cm3}$

Si on l'y portait par fractions de 4<sup>kg</sup>,500,  
on dépenserait.....  $243 \times 4 = 972$

C'est, dans le second cas, une économie de.....  $324^{cm3}$

représentant:  $\frac{324}{1296} = 25 \text{ 0/0}$  environ de la dépense totale. Toutefois on ne devra pas négliger le gaspillage qu'entraîneraient de nombreux *retours à vide*.

124. Des tableaux ci-dessus, donnant la valeur de  $D_d$  pour des poids croissants ou des vitesses croissantes, nous tirons la *dépense par kilogrammètre*. C'est :

|                          |                       |                       |                       |                       |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Par charge croissante..  | 14 <sup>cm3</sup> ,90 | 11 <sup>cm3</sup> ,90 | 12 <sup>cm3</sup> ,10 | 12 <sup>cm3</sup> ,20 |
| Par vitesse croissante.. | 13 ,70                | 11 ,30                | 10 ,00                | 9 ,10                 |

L'économie est ainsi continue avec la vitesse ; elle traverse une valeur *optimum* pour la charge de 3 kilogrammes, qui correspond à 11<sup>cm3</sup>,90 (*un minimum*). Au moyen de poids plus considérables, Laulanié, élève de Chauveau, trouve qu'en les portant à 6 mètres de hauteur en 75 secondes, on a (1) :

|                                     |                      |                      |                      |                      |                      |
|-------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Poids.....                          | 20 kg.               | 40 kg.               | 60 kg.               | 80 kg.               | 100 kg.              |
| Dépense par kilogram-<br>mètre..... | 3 <sup>cm3</sup> ,32 | 2 <sup>cm3</sup> ,38 | 2 <sup>cm3</sup> ,29 | 2 <sup>cm3</sup> ,08 | 2 <sup>cm3</sup> ,13 |

Le *minimum* de dépense est, dans ce genre de travail, vers 80 kilogrammes, à la vitesse de 0<sup>m</sup>,08. Nous retiendrons de toutes ces expériences qu'il existe des charges et des vitesses conduisant à la moindre dépense d'énergie ; cela est surtout sensible avec la vitesse, non pas en tant que nombre de contractions, succession rapide des mouvements, mais en tant que déplacements étendus. Dans la marche, par exemple, les pas petits et pressés sont plus coûteux que les grandes enjambées. Il est bon d'éviter cette sollicitation multipliée de l'action nerveuse. ces excitations et ces mises en train déjà condamnées plus haut. Chauveau a mis cette nécessité en évidence par un artifice expérimental. Les flexions du bras se succèdent en nombre croissant, dans la même proportion que le déplacement du poids, à chaque contraction, est décroissant, si bien qu'au total on porte le poids toujours à la même hauteur. L'effet de la multiplicité des contractions se traduit ainsi dans la dépense (2) :

(1) Laulanié, *Traité de Physiologie*, 1905, p. 792.

(2) A. Chauveau (*Compt. Rend. Acad. Sc.*, 1904, t. CXXXVIII, p. 1669 ; t. CXXXIX, p. 13).

Dépense par kilogrammètre :

|                         |                      |                      |                       |                       |
|-------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Poids de 3 kilogrammes. | 8 <sup>cm3</sup> ,40 | 8 <sup>cm3</sup> ,80 | 10 <sup>cm3</sup> ,40 | 10 <sup>cm3</sup> ,70 |
| — 6 —                   | 9 ,50                | 10 ,80               | 12 ,20                | 13 ,30                |

La dépense est donc, dans ces conditions, nettement croissante.

La combinaison de poids et de vitesse qui conduit à la *dépense minimum* se rencontre également dans le travail des moteurs hydrauliques, par exemple <sup>(1)</sup>.

125. Cas du travail résistant. — Chauveau entreprit, symétriquement aux expériences sur le travail moteur, des expériences sur le travail *résistant* <sup>(2)</sup>. Le poids, au lieu de s'élever, *descend*. Examinons les variations de  $D'd$  et de  $V - Ph$ .

| POIDS<br>DÉPLACÉ     | $D'd$              | $D_r$              | $V - Ph$           |         |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|
| 1 <sup>kg</sup> ,500 | 66 cm <sup>3</sup> | 40 cm <sup>3</sup> | 26 cm <sup>3</sup> | 1       |
| 3 ,000               | 131                | 79                 | 52                 | 2       |
| 4 ,500               | 206                | 133                | 73                 | ou 2,80 |
| 6 ,000               | 277                | 197                | 80                 | 3,07    |

L'augmentation de travail par variation de vitesse nous donnera :

| CONTRACTIONS | $D'd$              | $D_r$              | $V - Ph$           |         |
|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|
| 13           | 68 cm <sup>3</sup> | 36 cm <sup>3</sup> | 32 cm <sup>3</sup> | 1       |
| 26           | 114                | 44                 | 70                 | 2,18    |
| 39           | 161                | 63                 | 98                 | ou 3,09 |
| 52           | 201                | 76                 | 125                | 3,90    |

Ces résultats sont confirmatifs de ceux que nous avons obtenus dans le cas du travail moteur. Et la vitesse apparaît encore comme un facteur dominant d'*épargne énergétique*.

De là nous déduirons la *dépense par kilogrammètre*. C'est :

|                          |                      |                      |                       |                       |
|--------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Par charge croissante..  | 9 <sup>cm3</sup> ,90 | 9 <sup>cm3</sup> ,80 | 10 <sup>cm3</sup> ,30 | 10 <sup>cm3</sup> ,40 |
| Par vitesse croissante.. | 10 ,20               | 8 ,50                | 8 ,09                 | 7 ,50                 |

<sup>(1)</sup> G. Weiss (*Comptes Rendus Biologie*, 1903, p. 426); A. Chauveau, *Rapport scientifique sur trav. entrepris en 1905 au moyen des subventions de la caisse des recherches scientifiques*, Melun, 1906.

<sup>(2)</sup> A. Chauveau (*Compt. Rend. Acad. Sciences*, 1904, t. CXXXVIII, p. 108).

Il y a aussi un *minimum* de dépense avec le poids de 3 kilogrammes.

En calculant l'économie dans le transport d'un fardeau à une profondeur donnée, on trouve pour 6 kilogrammes et 17<sup>m</sup>,60 :

Si le transport est effectué d'un seul coup.  $277^{\text{cm}^3} \times 4 = 1.108 \text{ cm}^3$

Et s'il est effectué par fractions de 1<sup>h</sup>s,500.  $201 \times 4 = 804$

La différence.....  $304 \text{ cm}^3$

représente :  $\frac{308}{1.108} = 27 \text{ 0/0}$  environ de la dépense totale.

En comparant travail moteur et travail résistant, on pourra voir que la dépense du premier bénéficie de la *vitesse moins* que la dépense du second; résultat que nous avons déjà signalé, mais ici bien plus net.

**126. Travail volontaire. — Ergographie.** — L'expérimentation si précise à la fois et si ingénieuse de Chauveau a donc montré l'extrême importance de la *vitesse du travail*. Et il est apparu que la dépense, pour élevée qu'elle soit, traverse un *minimum* dans certaines conditions de charge ou d'effort. D'après les expériences de Trèves, en Italie, sur les fléchisseurs de l'avant-bras, il faut voir dans la résistance à vaincre la *cause déterminante* de l'effort. « C'est le sens de la résistance qui règle le fonctionnement du muscle (1) », c'est-à-dire l'excitation nerveuse motrice. Avec Chauveau, nous avons vu l'excitation nerveuse nécessiter une dépense d'énergie qui n'atteint pas moins de 2,50 0/0 de la dépense d'effort statique (§ 123); c'est une amorce coûteuse, et l'on a un réel intérêt à n'en pas abuser : le *travail volontaire*, qui règle l'effort au strict minimum, règle et ménage aussi l'intervention nerveuse.

Une caractéristique du *travail volontaire*, par cela même qu'il s'effectue sous la loi de la moindre dépense, est d'être toujours un *maximum*. Mais, pour avoir un *maximum économique*, il faut que la charge à déplacer ou l'effort correspondant, la vitesse et le temps, aient certaines valeurs bien déterminées, et celles-là seules. L'action musculaire est périodique (§ 93) à cause de la fatigue; la recherche d'un maximum absolu ne peut donc se rapporter qu'à une période de temps,

(1) Trèves (*Arch. ital. de Biologie*, t. XXX, p. 1 et 11; 1898).

ou à une suite de périodes séparées par des intervalles de repos.

Ces études, si précieuses pour l'industrie, ont été abordées au moyen des *ergographes* (de *εργον*, travail) dont Mosso imagina le premier type (voir *Technique*, § 232). Le principe des ergographes consiste à opposer aux muscles une résistance (un poids  $P$ ) et à inscrire les raccourcissements par la méthode graphique. Soit  $h$  la hauteur d'un tracé (l'amplitude) ; le travail sera  $Ph$  par contraction,  $nPh$

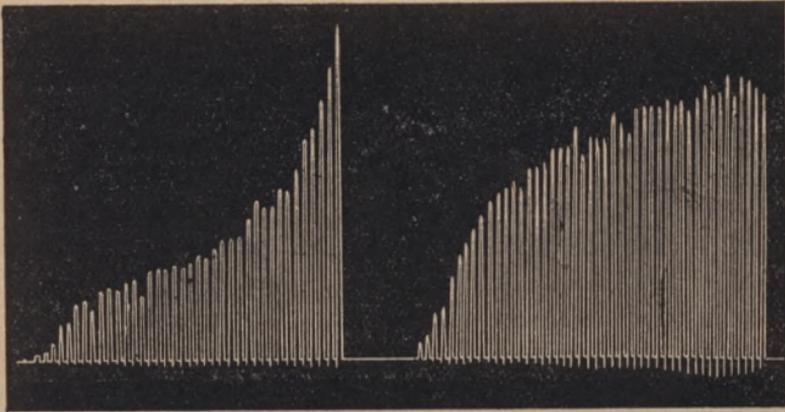


FIG. 136. — Types d'ergogrammes.

pour une période jusqu'à la fatigue ; on obtient ainsi un *ergogramme* (fig. 136), à amplitudes décroissantes, lesquelles se succéderont à un *rythme* plus ou moins rapide. La contraction musculaire volontaire dure au moins 6 à 7 centièmes de seconde, soit environ 1000 par minute. Mais ce rythme est impossible dans la pratique, comme nous l'avons déjà dit (§ 94).

Le rythme des contractions ménage un *intervalle de repos nécessaire à la réparation des muscles* (voir *Fatigue*, § 153). C'est là un fait capital sans lequel on ne comprendrait pas pourquoi, dans la machine vivante, les mouvements sont *alternatifs*, alors que les mouvements *rotatifs* de nos moteurs sont les plus économiques et les plus réguliers. Dans la rotation, il n'est pas possible de réaliser la réparation

organique indispensable, ni de débarrasser les foyers cellulaires de leurs déchets.

127 Voici, maintenant, ce que les ergogrammes ont montré :

Chaque groupe musculaire produit un maximum de travail pour une valeur déterminée de la charge. En modifiant celle-ci, il faudra également modifier le rythme des contractions. Ainsi le rythme étant de 6 par minute, et le poids à déplacer de 3 kilogrammes, les muscles fléchisseurs du doigt *médius* pourront travailler presque *indefinitement*. Doublons le poids, il sera nécessaire de doubler l'intervalle de repos. Quand on donne à ces repos une valeur 4 fois plus grande environ, on dépassera même le maximum de travail précédent. Mais il convient de retenir que la durée du repos, nécessaire à la réparation du muscle, augmente *plus vite* que la charge soulevée.

Au lieu de tracer l'ergogramme *au complet*, jusqu'à l'apparition de la fatigue (amplitude presque nulle), on a souvent intérêt à interrompre le travail par une halte de quelques minutes avant la fatigue. Par exemple <sup>(1)</sup>, sous une charge de 3 kilogrammes et au rythme de 30 par minute, effectuons 15 contractions successives et reposons-nous une demi-heure ; nous aurons par jour un travail de :

28<sup>kgm</sup>,164 (*médius droit*) et 26<sup>kgm</sup>,855 (*médius gauche*).

Mais on aurait été fatigué plus vite si, poussant l'ergogramme *jusqu'à son terme*, on l'avait fait suivre d'un repos même égal à deux heures ; le travail journalier eût été seulement de :

13<sup>kgm</sup>,674 (*médius droit*) et 14<sup>kgm</sup>,742 (*médius gauche*).

*La fréquence des intervalles de repos vaut donc mieux que la durée prolongée de chacun d'eux.*

En modifiant la charge, on trouve par *ergogramme complet*

(1) A. Maggiora (*Arch. ital. Biol.*, t. XIII, p. 210 ; 1890).

et au rythme de 30 :

|                   |      |      |      |           |
|-------------------|------|------|------|-----------|
| Charge . . . . .  | 1    | 2    | 4    | 8 kg.     |
| Travail . . . . . | 2,24 | 2,66 | 1,90 | 1,04 kgm. |

L'optimum de charge : 2 kilogrammes, permet un travail journalier maximum, au rythme de 30, et avec halte de une minute au lieu de une demi-heure. Enfin le rythme a une grande importance ; pour une même charge de 6 kilogrammes, le travail journalier est de 34 kilogrammètres ou seulement de 1 kilogrammètre suivant que le rythme est de 6 ou de 15. A cette allure de 6, le travail est presque indéfini, quand l'effort ne dépasse pas 6 kilogrammes.

Le maximum de travail est donc la résultante d'un effort et d'un rythme appropriés à une action à peu près continue. D'après Trèves, cette condition se traduit par une *dépense nerveuse minimum* ; celle-ci se règle sur l'effort des muscles, mais il ne faut pas que la résistance à vaincre nécessite un trop grand effort (1). D'ailleurs, on sait que cette résistance irrite la fibre musculaire ; on la voit s'allonger et se raccourcir (2) ; et c'est alors que les nerfs proportionnent l'effort. La limite de charge, compatible avec un travail maximum, est d'autant plus faible que les muscles avaient travaillé davantage : d'où l'intérêt qu'il y a, dans un labeur de quelque durée, à exercer un effort de valeur *progressivement décroissante*. Fick (3) avait déjà reconnu ce *principe de l'allègement* comme la condition du plus grand travail journalier ; et Blix (4) démontra ensuite qu'une charge élevée *distend* la fibre musculaire et la rend impropre au meilleur fonctionnement.

C'est donc un enseignement de haute portée pratique de travailler toujours *au-dessous* de la limite d'effort qui eût

(1) Trèves (*Arch. ital. de Biologie*, t. XXXVI, 1901, p. 47; *Arch. di Fisiol.*, 1904).

(2) Von Anrep (*Pfl. Arch.*, 1880, t. XXI, p. 226) ; Blix, *Skand. Arch. f. Physiol.*, 1893, t. IV, p. 399) ; Benedicenti (*Arch. ital. de Biol.*, t. XXV, p. 379 ; 1896 : il s'agit ici des muscles de l'homme directement).

(3) A. Fick (*Pfl. Arch.*, 1891, t. L, p. 189).

(4) Blix (*Skand. Arch. f. Physiol.*, 1895, t. VI, p. 240).

conduit au travail maximum. Ce travail *sous-maximal* procure une certaine économie de force et prépare à l'exercice d'efforts considérables ; il ne gaspille pas l'énergie nerveuse en ne donnant pas lieu à une intervention trop renouvelée des excitations neuro-musculaires (voir aussi § 124 et 126). Mais si, au lieu d'alléger la charge, on était contraint de l'augmenter après un moment de travail, il suffirait de *ralentir* le rythme des contractions. Le rôle de la « volonté » consiste, précisément, à assurer le maximum de travail sous la loi de la moindre fatigue.

128. **Optimum mécanique et optimum économique.** — Il était naturel d'induire des expériences précédentes que le travail maximum journalier est celui-là qui s'effectue le *plus économiquement* ; en un mot le *kilogrammètre* ainsi produit est le moins onéreux pour l'organisme.

Ce n'est pas cependant ce que Laulanié a établi (1). En effet, un homme qui travaille au *frein à poids* de l'auteur (voir *Technique*, § 231) donne la consommation d'oxygène suivante :

| CHARGE | VITESSE*            | TRAVAIL<br>EN 5 MINUTES | DEPENSE<br>PAR KILOGRAMMÈTRE |
|--------|---------------------|-------------------------|------------------------------|
| 1 kg.  | 1 <sup>ca</sup> ,49 | 448 kgm.                | 3 <sup>cm</sup> 3,56         |
| 2      | 1,07                | 642                     | 2,44                         |
| 3      | 0,80                | 726                     | 2,18                         |
| 4      | 0,61                | 778                     | 2,16                         |
| 5      | 0,54                | 842                     | 2,21                         |
| 6      | 0,44                | 853                     | 2,26                         |
| 8      | 0,37                | 896                     | 2,44                         |
| 10     | 0,29                | 905                     | 2,86                         |
| 12     | 0,24                | 906                     | 3,12                         |
| 15     | 0,13                | 570                     | 5,31                         |

L'« optimum mécanique » 905 *kilogrammetres* ne correspond pas à l'« optimum économique » 2<sup>cm</sup>3,16 par kilogrammètre, pour employer les expressions de l'auteur. Nous verrons de même que la dépense minimum, dans la marche, sans

(1) Laulanié, *Traité de Physiologie*, 2<sup>e</sup> éd., Paris, 1905, p. 803.

port de fardeaux, est celle d'une vitesse horaire de  $4^{\text{km}},500$  environ <sup>(1)</sup>. Nos muscles travaillent, surtout par suite d'une longue habitude et par une expérience acquise ou héréditaire, en économisant le budget énergétique, et ils règlent à cet effet leur effort et leur vitesse avec une précision et une sûreté inimitables, grâce à l'action régulatrice du système nerveux.

**129. Travail maximum de l'homme.** — 1° *Point de vue mécanique.* — Du point de vue industriel, c'est le travail mécanique évalué en kilogrammètres que l'on doit considérer dans un grand nombre de professions. Comme disait Montgolfier, « c'est la force vive qui se paie ». Or, l'évaluation de ce travail se fait en déterminant la *puissance* de l'homme, produit de son effort et de sa vitesse dans une période de temps égale à une seconde et en multipliant cette puissance  $F \times v$  par la durée effective du travail en secondes ; d'où :

$$\bar{c} = F \times v \times t.$$

Ces trois facteurs sont quelconques, mais ils peuvent prendre certaines valeurs remarquables pour lesquelles le produit  $F \times v \times t$  est un *maximum*.  $\bar{c}$  sera, dans ces conditions, le plus grand « travail journalier » de l'homme.

Géomètres et physiciens (Daniel Bernoulli, Euler, Coulomb, etc.) cherchèrent le maximum de  $F \times v \times t$ , par voie théorique <sup>(2)</sup>. Le plus grand de tous, Coulomb, sut allier la théorie à l'expérimentation. Le principe de sa méthode était le suivant : un bon ouvrier, sans porter de fardeau, peut s'élever à une hauteur  $H$  (en montagnes), dans sa journée ;

(1) Jules Amar (*Journal de Physiologie*, 1911, p. 217). — Voir A. Imbert, *Mode de fonctionnement économique de l'organisme*, 1902 (coll. *Scientia*).

(2) Sur la foi de Coulomb, divers auteurs ont reproché à Daniel Bernoulli d'avoir méconnu cette loi physiologique qu'il n'est pas indifférent de compenser la vitesse par l'effort, de telle manière que la puissance demeure constante. Les écrits de Bernoulli témoignent que cette erreur ne fut jamais la sienne (*Hydrodynamica*, 1738, section 13, § 21 ; — Prix Acad. Sciences, 1768, t. VIII, p. 4). Il obtint  $F = 15 \text{ K}$ , et  $v = 0^{\text{m}},66$  dans le travail journalier maximum des bras.

c'est un travail PH. Chargé d'un fardeau Q, il ne peut s'élever qu'à H', soit un travail (P + Q) H'; c'est une diminution PH - (P + Q) H', occasionnée par la valeur Q de la charge. Au moyen de la règle, connue en analyse, des *maximis et minimis*, Coulomb calcule la valeur Q' de la charge qui réduira le moins la grandeur du travail journalier, c'est-à-dire celle qui en fera un maximum. Il la trouve égale aux 4/5 du poids du sujet; mais il n'en déduit pas, comme on le lui a fait dire à tort, une *règle générale*.

Citons un exemple de cette méthode d'après Coulomb : Un homme de 65 kilogrammes a pu s'élever au sommet du Tenériffe (2.923 mètres), faisant ainsi 189.915 kilogrammètres dans sa journée. Chargé d'un fardeau de 68 kilogrammes, il a pu faire 103.336 kilogrammètres; c'est une diminution de 84.579 kilogrammètres pour la charge considérée, ou de  $\frac{84.579}{68}$  par kilogramme, ou enfin de  $\frac{84.579}{68} \times Q'$  pour une charge Q'; écrivons  $b \times Q'$ , en lettres, et appelons a le travail sans fardeau; nous aurons  $a - bQ'$  comme expression du travail possible; si la hauteur, dans ces conditions, se réduit à h on aura une nouvelle expression (65 + Q') h du même travail; d'où l'égalité :

$$a - bQ' = (65 + Q') h, \quad \text{et} \quad h = \frac{a - bQ'}{65 + Q'}$$

Le travail utile étant celui du fardeau, Q'h, nous aurons :

$$Q'h = Q' \frac{a - bQ'}{65 + Q'} \quad \text{ou} \quad \mathfrak{C} = Q' \frac{a - bQ'}{P + Q'}$$

Pour avoir  $\mathfrak{C}$  maximum, on fera varier Q' et égaliser à zéro la dérivée du second membre. Cela donne :

$$Q' = P \left[ \left( 1 + \frac{a}{bP} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right].$$

En remplaçant par les chiffres, on trouve : Q' = 53 kilogrammes, et Q'h = 55.350 kilogrammètres; ce qui donne  $h = \frac{55.350}{53}$  et un travail total

$$(65 + 53) h = \frac{(65 + 53) 55.350}{53} = 123.232 \text{ kilogrammètres.}$$

Ce travail maximum avec fardeau est environ  $\frac{123.232}{189.915} = \frac{65}{100}$  du travail sans fardeau, ou sensiblement les 2/3.

Coulomb détermina le maximum de travail dans un grand

nombre de professions, toujours guidé par l'expérience et le calcul <sup>(1)</sup>; nous y reviendrons.

Pour faire usage de la méthode que nous venons d'expliquer, il est nécessaire — Coulomb le disait nettement — de s'adresser à des ouvriers robustes et travaillant à la tâche. Nous ajouterons qu'il convient de multiplier les expériences et de ne soumettre au calcul que des valeurs moyennes incontestables. Celles de Coulomb, tirées *toujours* d'une observation unique, et parfois empruntées à des observateurs peu sûrs, n'ont pas assez de poids, malgré l'autorité hors de pair du célèbre physicien.

Toutefois c'est à lui que revient l'honneur d'avoir introduit, dans la science, ce genre de recherches, que d'autres, plus tard, rendront si propres aux applications industrielles; tels Frédéric Taylor, Gilbreth, etc. (voir § 316-17).

130. Une autre méthode, inaugurée par de La Hire <sup>(2)</sup> en 1702, fut surtout développée par Coriolis <sup>(3)</sup>, en 1829. C'est celle dont se servent les hydrauliciens pour calculer le travail d'un courant d'eau actionnant les aubes d'une roue hydraulique, par exemple. Ces savants imaginent qu'un fluide circule dans les muscles avec une vitesse  $u$ . L'homme, d'un poids  $Q$ , effectuera un maximum de travail à la vitesse  $V$ , et, s'il est chargé d'un poids  $P$ , il travaillera à la vitesse  $v$ . En admettant que les efforts sont proportionnels aux carrés des vitesses, le calcul conduira aux résultats suivants :

1° L'homme produit un travail maximum en élevant un fardeau à peine égal aux  $\frac{3}{5}$  du poids de son corps <sup>(4)</sup>.

(1) C.-A. Coulomb (1736-1806), *Mémoire sur la force des hommes*, écrit en 1786, au retour de son voyage en Martinique, mais paru en 1799 (an VII) dans les *Mémoires de l'Institut*, t. II, et dans *Théorie des Machines*, chez Bachelier, 1821.

(2) De la Hire (*Mém. Acad. Roy. Sciences*, 1702).

(3) Coriolis : Du calcul de l'effet des machines, p. 278-279 ; 1844 (2<sup>e</sup> ed.).

(4) La méthode de Coulomb donnait un peu plus de  $\frac{4}{5}$ , dans le travail d'ascension des fardeaux (§ 129).

2° La vitesse est, dans ces conditions, les  $\frac{48}{100}$  de celle qu'il prendrait en se déplaçant sans fardeau.

Le calcul est d'ailleurs très simple; la proportionnalité des efforts aux carrés des vitesses donne :

$$Q = K(u - V)^2,$$

et le travail maximum par seconde sera :

$$QV = K(u - V)^2 V,$$

K étant une constante.

De même :

$$(Q + P) = K(u - v)^2 \quad \text{et} \quad (Q + P)v = K(u - v)^2 v.$$

Pour avoir QV maximum, il faut  $V = \frac{u}{3}$ , d'où  $Q = \frac{4}{9} Ku^2$ .

Pour avoir  $(Q + P)v$  maximum, il faut :

$$v = \frac{2}{3} u - \sqrt{\frac{u^2}{9} + \frac{P}{3K}}.$$

Remplaçons Q par sa valeur  $\frac{4}{9} Ku^2$ , nous aurons :

$$v = 0,474V, \quad \text{environ} \quad \frac{48}{100} V,$$

et, d'autre part, nous déduirons de  $(Q + P) = K(u - v)^2$  :

$$P = 0,597Q, \quad \text{ou sensiblement} \quad P = \frac{3}{5} Q.$$

131. Le travail par seconde, soit le produit  $F \times v$ , a une valeur maximum que divers auteurs ont tenté de déterminer *a priori*. C'est ainsi que, d'après Euler, on peut le représenter par l'une des formules suivantes :

$$F = F' \left(1 - \frac{v}{v'}\right)^2 \quad \text{ou} \quad F = F' \left(1 - \frac{v^2}{v'^2}\right),$$

$F'$  et  $v'$  étant l'effort et la vitesse les plus grands (absolus), qui rendraient tout travail impossible.

De la première formule on tire :

$$v = \frac{v'}{3}; \quad \text{d'où} \quad F = \frac{4}{9} F' \quad \text{et} \quad Fv = \frac{4}{27} F'v';$$

c'est la *puissance maximum*.

D. Bernouilli avait trouvé  $F' = 34$  k. et  $v' = 2$  m. D'où les valeurs ci-dessus (§ 129):

$$F = 15 \text{ k}; v = 0^m,66.$$

De la seconde formule on tire :

$$v = \frac{v'}{2} \quad \text{et} \quad Fv = \frac{3}{8} F'v'.$$

Schultze<sup>(1)</sup> obtint, dans la traction des fardeaux :

$$F' = 48 \text{ à } 49 \text{ kilogrammes}; \quad v' = 1^m,60.$$

Par suite, la première formule donne :

$$v = 0^m,53; \quad Fv = 11^{\text{kgm}},500 \text{ environ.}$$

Il reconnut par expérience, que l'homme développe en travail continu un effort de  $13^{\text{kg}},7$  à la vitesse de  $0^m,74$ , soit une puissance de  $10^{\text{kgm}},14$  conforme à la théorie d'Euler.

Langsdorf<sup>(2)</sup> vérifia ce même résultat ; il eut :

$$v = 0^m,757; \quad F = 13,30; \quad \text{d'où} \quad Fv = 10 \text{ kilogrammètres.}$$

La première formule d'Euler qui se représente graphiquement par une parabole (fig. 137) est donc suffisamment correcte. Mais le temps  $t$  doit être introduit dans ces relations si l'on veut qu'elles aient une signification pratique. En appelant  $F_1$ ,  $v_1$ ,  $t_1$  les facteurs du travail journalier maximum, on obtient des formules telles que celle de Mascheck<sup>(3)</sup> :

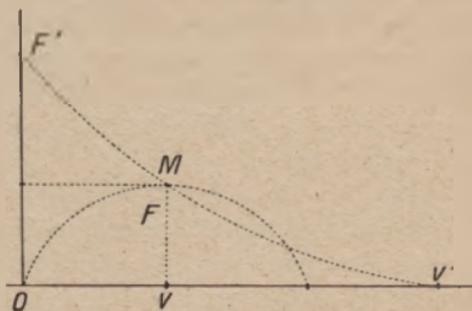


FIG. 137.

$$F = \left( 3 - \frac{v}{v_1} - \frac{t}{t_1} \right) F_1,$$

(1) Schultze (Bibliothèque britannique, 1783, t. LVI).

(2) Cité par Ruhlmann (*Allg. Maschiennenlehre*, t. I, p. 268, note).

(3) Cité par Simms (*Minutes of the Proceed of the Instit. of civil Engin.*, vol. II, p. 112).

et de Gerstner<sup>(1)</sup> :

$$F = \left(2 - \frac{v}{v_1}\right) \left(2 - \frac{t}{t_1}\right) F_1.$$

Ces formules sont assez médiocres. Les ingénieurs allemands<sup>(2)</sup> admettent que, pour un travail de huit heures par jour, l'effort normal de l'homme représente le tiers de son poids, 20 à 25 kilogrammes. Nous verrons qu'il n'en est pas souvent ainsi, et que le calcul ne saurait remplacer l'expérience.

132. 2<sup>o</sup> Point de vue énergétique. — La notion de « fatigue » avait, dans l'esprit de Coulomb, la valeur que nous attribuons à l'idée d'énergie. « Toute la question, écrivait-il, se réduit à chercher quelle est la manière dont il faut combiner entre eux les différents degrés de pression, de vitesse et de temps, pour qu'un homme, à *fatigue égale*, puisse fournir le plus grand travail. » Mais la fatigue est une chose imprécise, difficile à définir. Il y a fatigue, si l'on veut, dès le premier kilogrammètre effectué, car chaque unité de travail a un effet, souvent négligeable, mais réel, sur l'organisme. A la limite où les forces humaines sont incapables d'exercice, la fatigue est un état plus pathologique que physiologique, et tous les degrés antérieurs à cet état ne sont susceptibles d'aucune mesure précise (§ 153), la *sensation* n'étant pas une grandeur physique.

Il serait donc infiniment désirable de pouvoir substituer à la sensation de fatigue l'évaluation *directe du travail possible*. Or cela est souvent difficile, d'autant plus que le travail des muscles est supérieur à celui des outils sur lesquels ils agissent, et qu'il est complexe, formé d'éléments incertains : habileté de l'ouvrier, perfection des outils, etc. Il s'ensuit que l'évaluation de la *dépense énergétique*, soit d'après la consommation d'oxygène, soit d'après la ration d'entretien, est le guide le plus certain pour nous renseigner sur la grandeur du travail musculaire, sur « le degré de fatigue » à tout

(1) Cité par Simms (*loc. cit.*) et *Mécanique* de Gerstner.

(2) Weisbach, *Lehrbuch d. Ingen. und Maschinen-Mechanik*.

instant, et pour comparer entre eux des travaux non directement comparables; les troubles physiologiques constatés marqueront les limites de la fatigue. Cette indication, relative à une méthode énergétique, nous la développerons au sujet du travail professionnel.

**133. Marche de la machine humaine. — Loi du repos.** (J. Amar). — L'élévation de la dépense d'énergie — témoin fidèle de la grandeur du travail effectué par les muscles — doit être faite quand l'homme est parvenu à un *état de régime normal*, tant au point de vue de son action mécanique que de sa respiration, de ses échanges gazeux. La marche normale, à vitesse constante, si difficile à réaliser rigoureusement dans nos machines usuelles, nous savons que bien vite l'homme y atteint, grâce à la coordination des sensations et des mouvements, à ce qu'on a appelé aussi « le sens musculaire » ou sens de la résistance, grâce en un mot aux *centres nerveux* (1). La période de tâtonnements, la « mise en train » est d'autant plus courte que le sujet a une plus longue expérience de son travail, et que son « équation personnelle » est plus faible (§ 86). La marche normale persiste tout le temps que la fatigue n'a pas diminué l'excitabilité musculaire; dans les cas extrêmes, cette fatigue se fait sentir sur les centres nerveux eux-mêmes et trouble la coordination.

Certains traits de la marche de la machine humaine demandent à être signalés: ils se révèlent dans la dépense énergétique. Cette dépense, lors de la mise en train, s'accélère brusquement; l'oxygène consommé les deux premières minutes dépasse tellement la quantité de gaz carbonique éliminé que le quotient respiratoire  $\frac{CO_2}{O_2}$  subit un abaissement de 15 0/0 environ. Puis la ventilation devient rapidement régulière.

En répétant la mise en marche plusieurs fois, après des intervalles de repos de quelques minutes, on constate un abaissement moins sensible du quotient respiratoire. Ce qui

(1) S.-A. Pari et Farini (*Atti del Real Istituto Veneto*, t. XIV, p. 929; 1904-1905).

semble indiquer une adaptation du sujet à la marche normale, adaptation qui atténue les écarts de la dépense (1).

L'état de régime une fois atteint, la dépense s'accélère peu à peu; des groupes musculaires jusque-là inactifs interviennent dans le travail; les réactions chimiques qui fournissent l'énergie sont plus rapides et gagnent en étendue. Au bout d'une *demi-heure*, cependant, la dépense est presque régulière, uniforme (2), et peut être évaluée comme on l'a dit. Enfin, si l'*arrêt* du travail vient à se produire, la dépense ne retombe pas à sa valeur statique; *elle y tend d'autant plus vite qu'elle s'était élevée davantage*, c'est-à-dire que le travail avait été plus intense. La « loi du repos » a la même allure que la loi de Newton sur le refroidissement des corps chauds (3). Ceci est très important, puisque le *travail rapide* qui, déjà, présente l'avantage d'être économique, sera également le moins persistant dans ses effets postérieurs (4). Les échanges respiratoires subissent une perturbation de sens inverse à celle du début: le gaz carbonique s'élimine relativement en plus grande quantité que l'oxygène n'est absorbé; on observe donc une élévation du quotient respiratoire (5).

Plus simplement, on peut mesurer la *ventilation pulmonaire*, c'est-à-dire le volume d'air respiré à chaque minute. On constate qu'il suit la même loi *logarithmique* que l'oxygène consommé, ou le refroidissement des corps chauds. Il est intéressant de noter que, sur des gens normaux, quelque exercice qu'ils fassent, leur ventilation retombe à sa valeur initiale après 4 minutes de repos.

(1) Jules Amar (*Comptes Rendus Acad. Sciences*, 1910, t. CLI, p. 680).

(2) Jules Amar (*ibid.*, p. 892); *Le Rendement de la machine humaine*, p. 64-65, Paris, 1910.

(3) *Id.* (*Comptes Rendus Sciences*, 1913, t. CLIII, p. 79). La courbe est dite *logarithmique* ou *hyperbolique* (§ 85).

(4) Les mesures d'Atwater, sur la dépense énergétique de deux heures en deux heures (§ 112), vérifient la loi du repos que nous venons d'expliquer.

(5) Katzenstein (*Pflüger's Arch.*, 1891, t. XLIX, p. 330).

Sinon, il y a eu surmenage, ou l'on est en présence d'un organisme malade (1).

Toutes les perturbations qui affectent les échanges gazeux semblent atteindre bien plus l'élimination du gaz carbonique que la consommation d'oxygène; en régime normal nous pouvons toujours admettre que l'oxygène donne la mesure la plus correcte de la dépense énergétique (§ 107).

**134. Heures des repas et Régimes.** — La marche de la dépense est variable dans les différentes heures du jour; le minimum a lieu de *trois à sept heures* du matin, pour l'homme au repos ou au travail (§ 112 et 113). D'autre part, l'intercalation des *repas* élève la dépense dans une proportion que modifie la nature des aliments. En partant de l'heure même du repas, on peut trouver le moment où celui-ci n'a plus d'influence sensible sur l'élévation de la dépense, et voir si le temps écoulé est indépendant de la nature de l'alimentation. Voici comment on a procédé: le sujet est à jeun depuis huit heures du soir; à huit heures du matin, il absorbe un *repas hydrocarboné*; on avait, au préalable, mesuré ses échanges gazeux à jeun, pendant cinq minutes. Depuis le moment du repas, et d'heure en heure, on recommence de semblables mesures de consommation d'oxygène.

Des déterminations symétriques à celles-là sont effectuées après un *repas azoté*.

Enfin, des séries analogues d'expériences, avec production de *travail* sur bicyclette à frein, équivalant pour dix minutes à  $2^{Cal},72$ , sont obtenues dans le cas du régime hydrocarboné ou du régime azoté, en *éloignant de plus en plus* l'heure du travail de celle du repas.

De toutes ces recherches il est résulté clairement :

1° Que l'élévation de la dépense, consécutive au repas, cesse tout de suite si ce dernier est hydrocarboné; la dépense est d'ailleurs progressivement *décroissante* jusqu'à la troisième et la quatrième heure;

2° Que l'élévation initiale s'accroît jusqu'à la troisième heure, si le régime est azoté, puis un arrêt se manifeste;

(1) L'étude complète de ce problème se trouve dans Jules Amar, *Les lois scientifiques de l'Éducation respiratoire*; Paris, 1920 (Dunod).

3° En conséquence le régime hydrocarboné est plus économique que le régime azoté ; les matériaux du premier sont plus vite utilisés que ceux du second ;

4° Toutes choses égales, la dépense en azotés est supérieure à la dépense en hydrates de carbone. Et cela, non seulement au repos et dans l'activité, mais aussi quand on évalue la dépense *strictement* consacrée à la production de travail. En un mot — et d'après les chiffres — un travail journalier en régime hydrocarboné réalise une économie de 4,50 0/0 sur le régime azoté <sup>(1)</sup>.

La difficulté de se nourrir plusieurs jours de substances grasses n'a pas permis d'étudier l'action de ces dernières.

On doit donc faire *deux repas* par jour, et en moyenne 1 heure avant de travailler, davantage si c'est possible (voir § 97 et 101).

**135. Conclusions : Lois générales.** — En résumant les lois et les expériences relatives à l'activité musculaire, on peut avancer les propositions suivantes :

1° Le *travail*, comparé au simple *soutien* d'une charge, nécessite une dépense énergétique supérieure, dans le même temps ; et le travail moteur, toutes choses égales, est plus dispendieux que le travail résistant ;

2° On réalise une économie sur la dépense en travaillant vite comme en fractionnant les charges, et en prenant des repos courts et fréquents ;

3° Les mouvements de grande amplitude sont plus économiques que ceux de petite amplitude et plus souvent répétés ; il existe un *rythme* pour le meilleur effet journalier ;

4° Dans un temps donné, on produirait un maximum de travail si la résistance à vaincre allait en diminuant progressivement ; en un mot, si la sensation de fatigue réglait elle-même l'effort des muscles ;

5° L'alimentation hydrocarbonée conduit à une économie de 4,50 0/0 de la dépense d'énergie, comparativement à un régime d'albuminoïdes ;

6° La *loi du repos* est à même d'assigner la durée des

(1) Jules Amar (*Comptes Rendus Acad. Sc.*, 1912, 19 février, p. 528 ; *Journ. de Physiol.*, 1912, p. 298).

intervalles de repos ou haltes au cours de la journée, dans quelque exercice que ce soit ; ils ne doivent pas descendre *au-dessous de 4 minutes*.

L'application des six lois précédentes à l'organisation scientifique du travail professionnel doit permettre à l'homme d'utiliser le mieux possible sa force musculaire, sans préjudice de sa capacité intellectuelle, toujours d'un très grand prix ; elle lui évitera, à coup sûr, de franchir les limites physiologiques d'une *activité normale*.

Elles établissent aussi la *durée journalière* d'un travail régulier, durée qui ne saurait être *uniforme*, vu la diversité des conditions professionnelles.

135 bis. — **Loi du minimum.** — Une seule loi, en réalité, gouverne la vie, parce qu'elle exprime la marche naturelle de l'évolution, c'est la *Loi du minimum*. On en a signalé les manifestations dans le mouvement de la matière ou de l'énergie (p. 87, 89, 132, 145, 147, 171-2), et montré, particulièrement, que la *nutrition* profonde des cellules s'effectue sous cette loi du minimum (p. 227-229). Les hydrates de carbone sont plus propres au travail des muscles que les graisses et les protéiques, parce que, pour un même travail, ils sont utilisés en moindre quantité et nécessitent moins d'oxygène.

Les *globules rouges* du sang offrent le minimum de masse pour la surface nécessaire au transport d'oxygène. Et l'action des muscles vise à la plus grande vitesse, c'est-à-dire au *minimum de temps*, comme la marche de la lumière qui se réfracte (p. 251). La Nature a donc une tendance réelle à éviter le gaspillage, à ne dépenser que le minimum, parce que, ce faisant, elle atteint le *maximum d'effets utiles* à la conservation des êtres (1).

---

(1) Jules Amar (*Comptes Rendus Acad. Sciences*, 12 février 1923).

## CHAPITRE II

### RENDEMENT DE LA MACHINE HUMAINE

**136. Définition.** — Le rendement est le rapport de l'énergie mécanique produite à l'énergie dépensée. Il a été expliqué ci-dessus que le rendement industriel  $r$  est une valeur brute déduite du rapport de l'énergie utile à l'énergie totale (statique et dynamique); tandis que le rendement net  $R$  ne fait intervenir que la seule dépense dynamique. On a (voir § 63) :

$$r = \frac{\mathfrak{E}}{D_s + D_d} \qquad R = \frac{\mathfrak{E}}{D_d}.$$

Exemple : un adulte dépense au repos 100 Calories par heure; en faisant un travail de  $25.500^{\text{kgm}} = 60$  Calories en une heure, il a dépensé en tout 340 Calories. Donc :  $D_s = 100$ ,  $\mathfrak{E} = 60$ ,  $D_d = 240$ , et

$$r = \frac{60}{340} = 17,6 \text{ 0/0}, \quad R = \frac{60}{240} = 25 \text{ 0/0}.$$

Si nous connaissions une fois pour toutes la valeur du rendement net du sujet, la grandeur de sa dépense fournirait celle de son travail :

$$\mathfrak{E} = R \times D_d.$$

Et pour avoir  $D_d$ , on mesurerait la consommation d'oxygène au repos, c'est-à-dire avant l'épreuve, et ensuite pendant le travail normal. A raison de  $4^{\text{Cal}},90$  par litre (à  $0^\circ$  et 760 millimètres), on calculerait l'énergie dépensée  $D_s$  et  $D_d$  dans une période de temps de quelques minutes (trente minutes en cours de travail).

Cette manière d'opérer est la seule correcte, attendu que l'état initial du sujet est toujours mal défini. En venant à l'usine dans un certain état de fatigue, l'ouvrier fait déjà une dépense statique élevée : il n'est donc pas possible de se baser sur sa dépense brute  $D_s + D_d$  pour calculer son travail ; en d'autres termes,  $r$  est très variable, beaucoup plus — nous allons le voir, — que le rendement net  $R$ .

Mais, auparavant, précisons les termes dont le quotient donne les rendements, net et brut. Tout d'abord, c'est le *travail mécanique utile*, l'effet industriel, quantité qui se laisse souvent évaluer sans encombre : le travail d'ascension sur une montagne, un escalier, une échelle, est le produit du poids du corps (avec ou sans fardeau) par la *hauteur* (verticale) montée ; — le travail d'un cycliste est le produit du chemin parcouru par les résistances passives de roulement, de glissement, etc. ; — le travail des bras ou des jambes sur des outils, le travail de la locomotion, sont encore mesurables, avec plus ou moins d'exactitude. L'on reconnaît néanmoins que cette grandeur mécanique est plus difficile à apprécier dans un cas que dans un autre. Et lorsque les mouvements sont divers, compliqués, le problème devient ardu, d'autant plus que tout effort statique de l'ouvrier échappe aux mesures, lors même que toute l'activité musculaire consisterait en efforts statiques.

En conséquence, dans une profession donnée, il est possible de comparer entre elles les quantités de travail utile de plusieurs ouvriers, vu que les circonstances sont à peu près semblables pour tous. D'une profession à l'autre, cette comparaison serait une impossibilité.

137. Il faut bien se dire, en effet, que l'activité humaine est plus en rapport avec le *travail musculaire* qu'avec le travail mécanique de l'outil. L'industriel a beau évaluer ce dernier travail, il n'empêchera pas l'ouvrier d'évaluer le premier sur les indications purement subjectives, mais très fidèles, de son degré de fatigue. Voici, par exemple, un *limeur* : le travail utile qu'il produit c'est le résultat de son effort pour vaincre la résistance du métal tout en déplaçant la lime. Mais ce résultat n'est obtenu que par un effort qui appuie

la lime sur la pièce et l'oblige à y mordre, par des retours de l'outil, par la vitesse, par une attitude appropriée de l'homme devant son établi, les balancements de son corps, une certaine inclinaison de la colonne vertébrale, une tension des muscles des membres supérieurs... Ces multiples efforts et travaux musculaires changent de direction et de grandeur avec les métiers. Tous, du plus grand au plus petit, nécessitent une dépense d'énergie, une consommation d'oxygène; et ils superposent leurs effets pour déterminer la fatigue. Ainsi, une profession étant considérée, *la plus grande somme de travail mécanique d'un homme lui est assignée par sa dépense d'énergie maximum*, dépense dont nous donnerons la valeur plus loin (§ 342). Et pour deux ouvriers différents, les quantités de travail sont entre elles comme leurs dépenses (1).

Les conséquences de ces principes au point de vue industriel seront développées ultérieurement.

138. — Ces observations nous permettent de revenir sur le rendement net des muscles. On écrit :

$$R = \frac{\mathcal{E}}{D_d},$$

et  $\mathcal{E}$  désigne, par exemple, le produit  $Ph$  du poids d'un homme s'élevant sur un escalier de hauteur  $h$ . Or  $D_d$  ne correspond pas *uniquement* à ce travail, puisque l'ascension a augmenté le travail du cœur et des *muscles respirateurs*. En chiffres ronds, nous admettons que les battements du cœur passent de 72 à 110 par minute dans un fort travail (250.000 kilogrammètres en huit heures), et le volume d'air respiré de 500 litres à 2.000 litres par heure. D'après la moyenne des expériences des auteurs, le cœur lance 150 grammes de sang par révolution sous une pression de  $\frac{1}{10}$  d'atmosphère environ, exactement à 1<sup>m</sup>,25 de hauteur; c'est un travail de

$$0,150 \times 1,25 = 0^{k5m},1875.$$

Au repos, ce sera :

$$0,1875 \times 72 = 13^{k5m},75,$$

(1) Il s'agit d'une même profession et de conditions de travail aussi semblables que possible. Cette doctrine, que nous enseignons et pratiquons depuis 1905, a été affirmée de nouveau par Waller en 1920; nous l'avons rappelée dans *Comptes Rendus Acad. Sc.* du 9 août 1920, en réponse à ce savant, qui se sert du gaz carbonique au lieu d'oxygène (§ 107).

et au travail (valeur ci-dessus) :

$$0,1875 \times 110 = 20^{\text{kgm}},625,$$

soit un excès de  $6^{\text{kgm}},875$  par minute, ou

$$6,875 \times 60 = 412^{\text{kgm}},50 \text{ par heure.}$$

Pour la respiration, la pression de l'air expiré varie de  $0^{\text{m}},06$  à  $0^{\text{m}},30$  d'eau (voir § 356) du repos au travail; ce qui donne :

$$500 \times 0,06 = 30 \text{ kilogrammètres,}$$

dans un cas,

$$2.000 \times 0,30 = 600 \text{ kilogrammètres.}$$

dans l'autre, par heure. L'excès de travail est donc de  $570$  *kilogrammètres* comme moyenne horaire. En remarquant que le volume d'air est inspiré, puis expiré, on aura un travail musculaire double, soit :

$$570 \times 2 = 1.140 \text{ kilogrammètres.}$$

La dépense  $D_d$  couvre, finalement, les frais d'un excès de travail des organes égal à :

$$412 + 1.140 = 1.552 \text{ kilogrammètres par heure.}$$

Et ce travail se dissipe en chaleur de frottements quant à la circulation sanguine (voir § 62). Dans un calcul minutieux du travail et du rendement musculaire il faut donc ajouter ces  $1.552$  kilogrammètres au travail des muscles par heure, et rapporter le tout à la dépense; le rendement sera, en conséquence, plus élevé que le

quotient  $\frac{G}{D_d}$

L'activation circulatoire et respiratoire déterminée par le travail des muscles est due à une *sécrétion* de ceux-ci, laquelle se porte aux centres nerveux qui commandent le cœur et les poumons; elle met au service des muscles une quantité d'oxygène plus importante, puisque, en passant plus souvent dans les poumons, le sang y absorbe de l'oxygène, gaz plus vite renouvelé, d'ailleurs, à la surface de ces derniers (voir aussi § 149).

**139. Remarque importante.** — En écrivant que le rendement est le quotient du travail utile par sa dépense, nous n'avons pas spécifié s'il s'agit de travail moteur ou de travail résistant. En général on ne considère que le premier; mais nous savons que le second, *mécaniquement égal*, entraîne une *dépense plus faible*. Un homme qui s'élève sur un escalier fait une dépense d'énergie supérieure à celle que nécessite la

(<sup>1</sup>) Asher et Spiro donnent une valeur supérieure (*Ergeb. d. Physiol.*, 1902, 1, 2<sup>e</sup> partie, p. 402).

descente du même escalier ; mais la descente est plus ou moins freinée par les muscles, ce qui modifie, dans de larges limites, la valeur correspondante de la dépense. Donc, le rendement d'un travail résistant est une notion dépourvue de sens, attendu que le moteur ne fournit pas le travail ; c'est la pesanteur qui en est la source, et c'est contre son accélération qu'il agit, tout comme un frein.

Quant au travail musculaire, il est évident que sa valeur est moindre dans ce cas que dans l'autre où il faut, non pas s'aider de la pesanteur, mais la vaincre. Et sa dépense est moindre dans la même proportion à peu près. Aussi prendrons-nous R comme le rendement à la fois du travail moteur et du travail résistant <sup>(1)</sup>.

**140. Essais de rendement.** — a) *Emploi du bicycle à frein.* — Tout d'abord nous citerons les déterminations des Américains, notamment sur un étudiant robuste, pesant 76 kilogrammes et âgé de vingt et un à vingt-trois ans. Sa dépense statique  $D_s$  est de 2.397 Calories, dans le calorimètre à 20° (voir § 411). En lui faisant accomplir des travaux de 200.000 à 250.000 kilogrammètres, on a obtenu les résultats suivants :

| ÉQUIVALENT<br>du<br>TRAVAIL | $D_s + D_d$<br>ou<br>$2.397 + D_d$ | $r = \frac{\mathcal{E}}{D_s + D_d}$ | $R = \frac{\mathcal{E}}{D_d}$ |
|-----------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| 505 Cal, 75                 | 4.764 Cal.                         | 10,61 0/0                           | 21,36 0/0                     |
| 517 ,82                     | 5.223                              | 9,09                                | 18,32                         |
| 547 ,52                     | 5.205                              | 10,51                               | 19,49                         |
| 562 ,07                     | 5.248                              | 10,70                               | 19,71                         |
| 587 ,33                     | 5.178                              | 11,34                               | 21,12                         |
| 594 ,76                     | 5.215                              | 11,40                               | 21,10                         |
| 607 ,00                     | 5.309                              | 11,43                               | 20,84                         |
| 1.481 ,70                   | 9.314                              | 15,90                               | 21,42                         |
| 675 Cal, 50                 | 5.682 Cal.                         | 11,82 0/0                           | 20,50 0/0                     |

La moyenne de R est 20,50 0/0 ; celle de  $r$  est 11,82 0/0, avec des variations telles que le travail, en croissant, amé-

(1) Jules Amar (*Comptes rendus Sciences*, 6 juin 1911, p. 1618).

liore ce rendement industriel. La durée fut de huit heures, sauf le dernier essai qui dura seize heures. Le rendement net paraît assez constant <sup>(1)</sup>; mais il s'éleva, dans certains cas <sup>(2)</sup>, à 23,80 0/0. De toutes façons cette valeur moyenne de 20,50 0/0 est faible. D'après von Frey, cela tiendrait à la tension des muscles du corps (dépense statique) pour maintenir l'équilibre huit heures sur l'appareil. Ajoutons que les frottements des pieds sur les pédales développaient une quan-

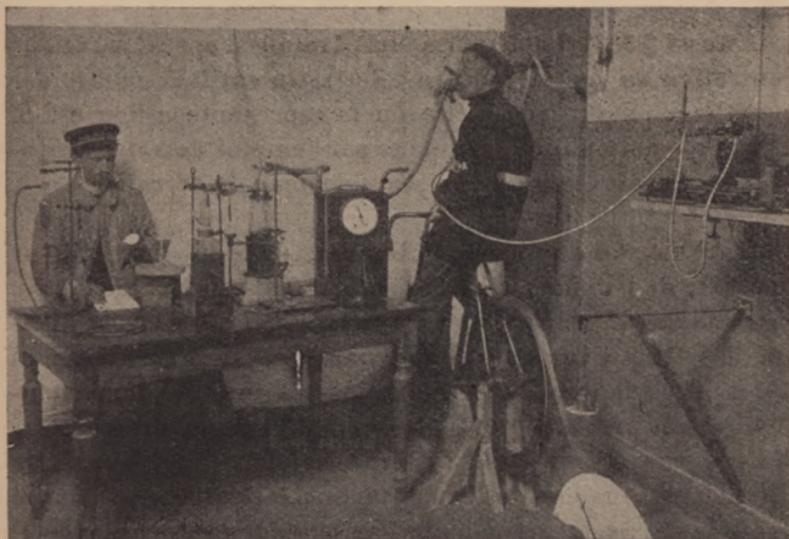


FIG. 138. — Bicycle à frein (J. Amar).

tité de chaleur que le calorimètre enregistrait comme dépense dynamique; que l'exactitude de l'ergomètre laissait quelquefois à désirer <sup>(3)</sup>, et enfin que le séjour si long dans le calorimètre pouvait être défavorable à un grand travail (§ 112); du reste, on fournissait un effort de 7<sup>kg</sup>,73, en moyenne, valeur assez élevée.

Avec notre *bicycle à frein*, qui sera décrit dans la technique (§ 231) et dont la figure 138 montre l'installation, nous avons fait travailler au moins une centaine de culti-

<sup>(1)</sup> Atwater et Benedict (*Bull.*, n° 136, p. 51, 66, 97, 184, 307; 1903).

<sup>(2)</sup> Atwater et Benedict (*ibid.*, p. 59).

<sup>(3)</sup> Atwater et Benedict (*l. cit.*, p. 34-35).

vateurs, hommes habitués à la vie active ; les expériences avaient lieu au grand air ; l'effort moyen atteignait rarement 400 grammes, et la durée ne dépassait pas quatre heures pour un travail journalier de 55.600 kilogrammètres environ, effectué au *rythme normal* de 90 à 92 coups de pédale par minute. En général, on travaillait deux heures le matin, et autant l'après-midi. Dans ces conditions favorables, on eut :

$$R = 32,50 \text{ 0/0}$$

(voir aussi § 303). La dépense était évaluée d'après les rations d'entretien au repos et au travail (1). On eut  $R = 28 \text{ 0/0}$  par la méthode respiratoire, telle que la représente la figure 138, et que l'on a simplifiée davantage par l'emploi de notre *Échantillonneur* (voir *Organisation physiologique du travail*).

141. b) *Emploi d'une roue à chevilles*. — Le sujet s'élève sur une sorte de treuil de carriers enfermé dans un calorimètre. On évalue sa dépense d'après l'oxygène consommé. A l'origine des études sur la thermodynamique humaine, Hirn (2) fit des expériences dans lesquelles les mesures calorimétriques sont probablement fausses ; mais nous avons celles de l'oxygène ; le quotient respiratoire était 0,99, vu que les sujets s'alimentaient de féculents. En adoptant  $5^{\text{Cal}},05$  pour le litre d'oxygène, nous calculerons la dépense assez exactement. Chauveau (3) corrigea, plus tard, la méthode de Hirn. Voici d'abord les chiffres de ce dernier, tels que nous les avons déduits d'une analyse approfondie et critique des expériences de l'auteur (4) :

(1) Jules Amar, *le Rendement de la machine humaine*, p. 60. — M. Jules Lefèvre, dans son *Traité de Bioénergétique*, a donné une interprétation erronée de notre calcul du rendement ; nous l'avons relevée dans *C. R. Sciences* de juin 1911.

(2) Ad. Hirn, *Recherches sur l'Equiv...* (*loc. cit.*) ; *Revue scientifique*, 1887.

(3) A. Chauveau (*Comptes Rendus Sciences*, 1901, 1<sup>er</sup> semestre, p. 194).

(4) On continue, malheureusement, dans plusieurs ouvrages, à reproduire les chiffres faux, livrés, sans explications suffisantes, par Hirn.

| POIDS<br>du<br>SUJET |            | DÉPENSE<br>STATIQUE D <sub>s</sub> | D <sub>s</sub> + D <sub>d</sub> | EQUIVALENT<br>du<br>TRAVAIL | R 0/0 |
|----------------------|------------|------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-------|
| I                    | 52 kg..... | 115 <sup>Cal</sup> ,25             | 348 <sup>Cal</sup> ,90          | 60 <sup>Cal</sup> ,97       | 26,09 |
|                      | — .....    | 115 ,25                            | 311 ,98                         | 54 ,09                      | 27,49 |
|                      | — .....    | 115 ,25                            | 301 ,14                         | 46 ,09                      | 24,79 |
| II                   | 61 kg..... | 84 ,02                             | 446 ,34                         | 64 ,90                      | 17,91 |
|                      | — .....    | 89 ,55                             | 460 ,95                         | 64 ,58                      | 17,38 |
| III                  | — .....    | 107 ,00                            | 407 ,34                         | 54 ,96                      | 18,29 |
|                      | 62 kg..... | 108 ,95                            | 381 ,11                         | 69 ,96                      | 25,70 |
| IV                   | 73 .....   | 95 ,22                             | 435 ,35                         | 76 ,59                      | 22,51 |
| V                    | 85 .....   | 115 ,28                            | 410 ,12                         | 78 ,42                      | 26,59 |
|                      |            |                                    |                                 |                             | 25,53 |

Les deux derniers sujets sont bien entraînés et robustes; le premier et le troisième (femme) sont des jeunes gens de dix-huit ans; le numéro II est le physicien Hirn lui-même. On voit que, dans ce cas, le rendement s'est abaissé à 17,50 0/0 environ; du reste, Atwater et Benedict obtinrent des valeurs aussi faibles en expérimentant sur des chimistes et autres hommes de laboratoire.

Hirn faisait durer ses expériences de quarante et une à quatre-vingt-dix minutes, dans un calorimètre maintenu à des températures qui furent de 17° à 23°.

Chauveau, dans des essais d'une heure, a vu le rendement net s'élever à 26,40 0/0 (§ 124); mais, pour les durées de huit à dix minutes, il ne trouva qu'une moyenne de 20,20 0/0.

Ainsi :

|                      |                       |                       |                       |                       |                       |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Travail.             | 35 <sup>Cal</sup> ,52 | 50 <sup>Cal</sup> ,47 | 65 <sup>Cal</sup> ,09 | 60 <sup>Cal</sup> ,74 | 71 <sup>Cal</sup> ,06 |
| D <sub>d</sub> ..... | 206 ,50               | 245                   | 277                   | 292                   | 380 <sup>Cal</sup>    |
| R.....               | 17,50                 | 20,60                 | 23,50                 | 20,80                 | 18,70 0/0             |

L'ensemble des recherches précédentes, surtout si l'on a égard aux rendements de 24 et 24,6 0/0 obtenus, après Atwater, par ses collaborateurs Benedict et Carpenter (1), conduit à une valeur de 25 0/0 au moins pour l'effet utile de l'énergie musculaire des jambes.

(1) Benedict et Carpenter (*Bull.*, n° 208, p. 39; 1909).

142. c) *Ascensions de montagnes ; marche.* — Dumas et Boussingault (1) citent une ascension du mont Blanc, effectuée en douze heures, et qui nécessita une dépense dynamique de 2.425 Calories, soit un rendement net :

$$R = \frac{4.810 \times 65}{2.425 \times 425} = 30 \text{ 0/0 environ ;}$$

la hauteur du mont Blanc est de 4.810 mètres, le poids du sujet, 65 kilogrammes.

Fick et Vislicénus, dans leur ascension du Faulhorn (1.956 mètres), calculèrent un rendement de 50 0/0 ! mais sur des données tout à fait contestables (§ 113).

Dans le travail de la *marche*, le plus ordinaire à l'homme, assurément, Katzenstein (2) a obtenu une dépense dynamique de 1<sup>cc</sup>,957 d'oxygène par kilogrammètre, soit :

$$0,001957 \times 4,90 \times 425 = 4^{\text{kgm}},075 ;$$

d'où l'on déduit

$$R = \frac{1}{4,075} = 25 \text{ 0/0 environ,}$$

résultat conforme aux précédents. Cependant Frentzel et Reach (3), étudiant dix sujets différents dans des marches ascendantes, eurent une moyenne de 32 0/0, avec un minimum de 28 0/0 et un maximum de 36 0/0.

Indubitablement, les membres inférieurs ont un entraînement particulier qui réduit leur dépense d'énergie si on ne les fait pas travailler contre leur effort naturel et leur vitesse normale. Dans la marche sur *plan incliné*, en montant (voir § 311), nous avons obtenu  $R = 29,40 \text{ 0/0 environ}$  (4).

143. d) *Emploi des muscles des bras.* — On connaît peu de bonnes expériences dans lesquelles le travail utile soit produit par les muscles des bras. L'emploi des ergographes

(1) Dumas et Boussingault, *Essai de statique des êtres organisés*, 1844.

(2) Katzenstein (*Pflüger's Arch.*, t. XLIX, p. 330 ; 1891).

(3) Frentzel et Reach (*Ibid.*, t. LXXXIII, p. 477 ; 1901).

(4) J. Amar (*Comptes Rendus Sciences*, mai 1914, p. 1327).

(§ 126) ne permet pas de séparer le travail moteur du travail résistant, et la dépense concerne, alors, un ensemble mécanique hétérogène ; il faut faire exception, toutefois, en faveur de l'ergographe de Hall (1) qui réalise cette distinction, bien que son usage ait été restreint.

Atwater et Benedict (2) avaient, tout au début, songé à faire soulever des poids (un bloc de fer de 5<sup>k</sup><sub>5</sub>,700) au moyen d'une corde passant sur une poulie et tirée avec les bras ; ils durent renoncer à cette idée, parce que le travail des bras eût été inégal et aussi à cause du travail négatif de la *descente freinée* dont la mesure est incertaine.

En faisant soulever des poids à une certaine hauteur et les laissant retomber, Hanriot et Richet (3) calculent  $R = 16$  0/0 environ, d'après la mesure des échanges gazeux, mais sans grande précision.

Dans des expériences, malheureusement *trop courtes*, deux à cinq minutes, et pour un travail de 560 à 1660 kilogrammètres effectué avec les bras sur un frein spécial, Laulanié (4) trouve de 21 à 23 0/0 pour le rendement net  $R$ . (voir § 128).

Armand Gautier (5) évalue la dépense dynamique par la ration d'entretien en employant des ouvriers des chais du Midi, travaillant dix heures par jour à puiser à la pompe. Il s'agissait du remplissage d'une cuve (15.000 litres), l'eau étant portée à une hauteur de 10 mètres, soit

$$\mathcal{E} = 15.000 \times 10 = 150.000 \text{ kilogrammètres.}$$

De petits travaux supplémentaires étaient évalués à 10.000 kilogrammètres.

Et l'on eut :

$$D_s = 2.643 \text{ Cal.}, \quad D_s + D_d = 4.218 \text{ Cal. en 24 heures.}$$

Par suite :

$$R = \frac{160.000}{425(4.218 - 2.643)} = 24 \text{ 0/0}, \quad r = \frac{160.000}{425 \times 4.218} = 9 \text{ 0/0.}$$

(1) W.-S. Hall, *Experimental Physiology*, 1904, p. 227.

(2) Atwater, Benedict et Woods (*Bull.* n° 44, p. 51 ; 1897).

(3) Hanriot et Richet (*Comptes Rendus Sciences*, t. CV, p. 78).

(4) Laulanié, *Traité de physiologie*, p. 792, 801, 803 ; Paris, 1905.

(5) A. Gautier, *L'Alimentation et les régimes*, Paris, 1909 ; 3<sup>e</sup> ed.

Ce travail, continu et fort, entraîne beaucoup de pertes (frottements sur le volant, la pompe, soulèvement de la partie supérieure du corps, 1.200 fois environ) que l'auteur évalue à 100.000 kilogrammètres.

Sur notre bicyclette à frein, actionnée par une manivelle, au lieu de la pédale, nous avons obtenu de 20 à 23 0/0.

Enfin, Heineman (1) donne, pour les muscles des bras,  $R = 22,60$  0/0.

**144. Variations du rendement.** — Les expériences de Chauveau ont montré l'influence de la vitesse et du fractionnement de la charge sur la grandeur de la dépense. En réduisant celle-ci, ils améliorent le rendement (§ 122 et suiv.). Ce qui est le plus important, c'est que le rendement s'améliore au fur et à mesure du travail. Exemple :

TRAVAIL DE 54.993 KILOGRAMMÈTRES SUR BICYCLE A FREIN (2)

| TEMPS                      | TRAVAIL        | RENDEMENT NET 0/0 |
|----------------------------|----------------|-------------------|
| 1 <sup>re</sup> heure..... | 13.748,25 kgm. | 29,33             |
| 2 <sup>e</sup> — .....     | —              | 31,23             |
| 3 <sup>e</sup> — .....     | —              | 33,81             |
| 4 <sup>e</sup> — .....     | —              | 35,03             |
| 4 heures.....              | 54.993,00 kgm. | 32,20             |

Et d'autre part, en variant la vitesse (fig. 139) :

| VITESSE PAR MINUTE        | TRAVAIL     | RENDEMENT NET 0/0 |
|---------------------------|-------------|-------------------|
| (1) { 70 coups de pédale. | 32.079 kgm. | 25,10             |
| { 80 —                    | 38.592      | 26,70             |
| { 90 —                    | 48.481      | 28,40             |
| (2) { 90 —                | 66.661      | 30,60             |
| { 100 —                   | 71.636      | 25,80             |

(1) Heineman (*Pflüger's Arch.*, t. LXXXIII, p. 441 ; 1901).

(2) Jules Amar, *le Rendement...*, p. 61-63.

De sorte que l'effet de la vitesse se fait sentir jusqu'à une certaine limite favorablement, puis change de sens.

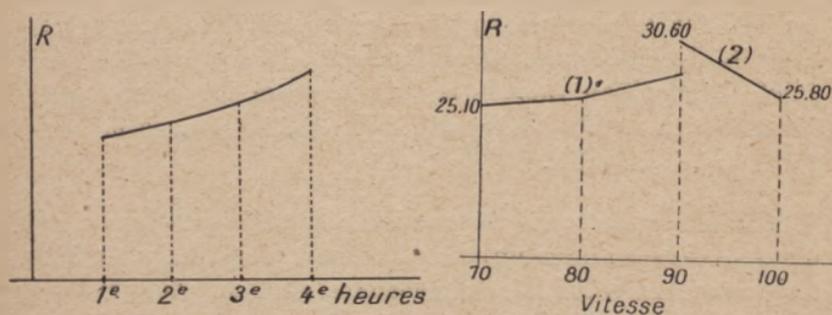


Fig. 139. — Variations du rendement.

Du reste la vitesse exerce la même influence sur le rendement des moteurs inanimés, par exemple les *moteurs à explosion*. Exemple (1).

| VITESSE<br>PAR MINUTE | RENDEMENT EFFECTIF<br>0/0 | On admet que le progrès du rendement est dû à la réduction des pertes calorifiques et à une meilleure utilisation du combustible. |
|-----------------------|---------------------------|---|
| 400 tours             | 16,10                     |   |
| 600                   | 18,80                     |   |
| 1.000                 | 19,30                     |   |
| 1.100                 | 18,40                     |   |
| 1.225                 | 15,40                     |   |

MM. G. Weiss et Chauveau firent des remarques analogues sur les moteurs hydrauliques (§ 124).

L'analogie entre les muscles et les moteurs à explosion, pour tentante qu'elle soit, ne peut pas être, cependant, poursuivie, attendu que ce ne peut être la même cause qui limite ici et là l'effet de la vitesse. Une valeur extrême de celle-ci empêche la réparation du tissu vivant et arrête la contraction musculaire par raison de fatigue. Sur le moteur thermique, c'est probablement un défaut dans l'admission des gaz, une mauvaise combustion qui paralyse l'ef-

(1) Hopkinson et Ricardo (*Génie civil*, 4 mai 1907).

fet cherché. Toutefois, dans le *canon*, de Krupp notamment, on obtient un rendement de 44 0/0, supérieur à tout ce que les moteurs thermiques ont donné de mieux <sup>(1)</sup>, et la raison en est que la combustion s'y effectue fort bien, malgré la rapidité de la détente, et qu'il résulte de cette vitesse une faible déperdition thermique par la paroi. Peut-être cette observation mérite-t-elle un rapprochement avec la contraction des muscles.

145. Les variations du rendement obéissent encore à d'autres causes : dans un travail normal, continu, mais sans fatigue excessive, la fibre musculaire devient plus *irritable*, et les fibres et les cellules nerveuses plus *excitables* ; le démarrage est moins onéreux <sup>(2)</sup>. Ce sont là des traits de l'*entraînement* ; ils se manifestent aussi dans l'accroissement de la force <sup>(3)</sup> et dans une faible consommation d'oxygène <sup>(4)</sup>.

Le travail volontaire, à vitesse et charge convenables — elles varient suivant les organes actifs — conduit à l'*entraînement* et au meilleur rendement énergétique.

146. On doit, enfin, considérer les pertes de travail dues aux résistances passives des outils. La « marche à vide » d'une bicyclette nécessite une dépense de travail, qui se dégradait en chaleur dans le calorimètre d'Atwater. Benedict et Carpenter <sup>(5)</sup> en faisant marcher le bicycle au moyen du courant électrique, évaluèrent les frottements des pédales et ceux de la marche à vide (*coasting*) à 6,50 0/0 du travail mécanique mesuré. C'est une fraction du travail pour laquelle les muscles ont fait une dépense d'énergie très appréciable.

En un mot, il est nécessaire de savoir quelle fraction exacte du travail musculaire est mesurée au frein du bicycle ou

(1) Aimé Witz, *Dernière Évolution du moteur à gaz*, p. 144 ; 1910. Paris.

(2) Storey (*Amer. Journ. of. Physiol.*, t. VIII et IX ; 1903).

(3) Manca (*Arch. ital. Biol.*, t. XVII, p. 390) ; Kronecker et Cutter (*Comptes Rendus Sciences*, t. CXXIX, p. 492 ; 1900).

(4) Grüber (*Zeitsch. f. Biol.*, t. XXVIII, p. 466 ; 1891).

(5) Benedict et Carpenter (*Bull.*, n° 208, p 27 ; 1909) ; Benedict et Cady (publication n° 467 ; 1912).

dans toute autre technique ergométrique, quel est le *rendement organique* du système *muscles et outils* (§ 63). Ce faisant on aura la valeur du *rendement réel*. Benedict et Carpenter (1), qui avaient obtenu  $R = 21,83$  et  $22,82$ , en corrigeant leurs mesures de l'effet du « *coasting* », eurent  $R = 23,40$  et  $24,60$ , soit une augmentation moyenne de  $6,50$  0/0 sur le rendement net, ainsi qu'il a été dit.

Une méthode très simple d'évaluation de la marche à vide (*coasting*) a été indiquée par Aimé Witz (2). La machine étant lancée à la vitesse voulue — soit un bicycle par exemple —, on retire brusquement la force motrice, l'action des pieds sur les pédales. La machine continuera à se mouvoir jusqu'à ce qu'elle ait épuisé l'énergie accumulée dans ses organes; elle effectuera  $N$  tours dans un temps  $t$  avant de s'arrêter. Si, au début, la vitesse était  $n_0$  tours par seconde, on partira de cette donnée pour écrire qu'à l'arrêt la diminution d'énergie est égale au travail des résistances. On arrive ainsi à l'expression :

$$W = 0,0055K \frac{n_0^2}{n} \text{ kilogrammètres.},$$

$W$  étant l'énergie dépensée par tour,  $K$  le moment d'inertie de la roue qui forme à la fois volant, et  $n = \frac{N}{t}$ .

Considérant une marche normale, à la vitesse de  $n'$  tours par seconde, la puissance absorbée par les frottements est :  $W \times n'$ . La puissance mesurée étant  $W'$ , on en déduira que le rendement organique est :  $\rho = \frac{W'}{n'W + W'}$  pour tout le système en mouvement.

Exemple : soient  $K = 0,28$ ,  $n_0 = 2$ ,  $n = 0,40$ ,  $n' = 2,05$ . Par suite :

$$Wn' = 0^{kgm},032.$$

On a mesuré  $W' = 1,93$  ; donc :

$$\rho = \frac{1,93}{1,93 + 0,032} = \frac{1,93}{1,962} = 0,98.$$

Cet essai a été effectué sur notre bicycle à frein, en relevant les vitesses par un enregistreur électrique (§ 231). D'une manière générale, la marche à vide de nos bicyclettes françaises absorbe près de 5 0/0 du travail total, soit un rendement organique de 0,95.

(1) Benedict et Carpenter (*Bull.*, n° 208, p. 39 ; 1909).

(2) Aimé Witz (*Comptes Rendus Sciences*, 3 août 1908), *Dernière Évolution du moteur à gaz*, p. 225.

147. **Résumé sur le rendement; rapport de Chauveau.** — Les expériences les plus complètes que nous possédions sur le travail de l'homme, effectué dans de bonnes conditions de charge, de durée, d'alimentation, conduisent à un rendement net de 25 0/0 en général :

$$R = \frac{C : 425}{D_d} = 0,25.$$

Cela est même un maximum quand il s'agit de l'exercice des bras.

Par contre, tout mode d'activité (marche, ascension, course en bicyclette, mouvement des pédales des machines sous la pression des pieds), qui utilise exclusivement les muscles des jambes, admet un rendement net de 30 0/0 en moyenne.

Pour pouvoir, à ce point de vue, confondre les travaux résistant et moteur, dont les dépenses sont si différentes, nous dirons que le premier équivaut aux  $\frac{52}{100}$  de l'autre.

En effet, dans ses expériences sur le treuil des carriers (§ 141), Chauveau avait trouvé ce rapport entre les dépenses:

$$D_d \left\{ \begin{array}{l} \text{Ascension. } 206,50 \quad 245 \quad 277 \quad 292 \quad 380 = 1.400 \text{Cal},50 \\ \text{Descente } \\ \text{freinée.. } \end{array} \right\} 147 \quad 131,50 \quad 143,50 \quad 144 \quad 203 = 738 \text{Cal},00$$

d'où :

$$\frac{738,00}{1.400,50} = \frac{52}{100};$$

mais ce rapport n'est valable que si la vitesse est la même dans les deux sens du mouvement et ne dépasse pas 0<sup>m</sup>,12 par seconde (§ 122).

Ainsi, trouvant 452 calories dans un travail de levage suivi de descente, on attribuera 100 calories à la dépense motrice et 52 calories à la dépense de chute freinée. Enfin, comme il s'agit des bras, on écrira :

$$\frac{C}{100} = 0,25; \quad \text{d'où} \quad C = 25 \text{ calories.}$$

L'effet utile est souvent celui-là seul, ces 25 calories. En tout cas, le travail musculaire est :

$$25^{\text{Cal}} + (52 \times 0,25) = 38 \text{ Calories.}$$

et le travail mécanique total :

$$25 \times 2 = 50 \text{ Calories.}$$

Il va de soi que l'on ne doit jamais négliger de faire travailler les muscles dans les conditions les moins onéreuses, et d'évaluer ce travail *d'après la dépense d'énergie*, ainsi que nous l'avions indiqué, *des 1909* ; cette évaluation offre « un intérêt exclusivement pratique » (1) ; l'idée en a été reprise par Jules Lefèvre sous le nom d'*Équivalent moteur* (2) du travail résistant (voir aussi § 313), et par Waller (3).

Rien de particulier à noter au sujet du rendement industriel ; il varie de 4 à 10 0/0 à mesure que la quantité de travail journalier augmente ; il atteint difficilement à 16 0/0. Dans un travail de huit heures par jour, il ne saurait s'abaisser *au-dessous de 10 0/0* sans être l'indice d'un mauvais emploi des forces musculaires, d'un gaspillage d'énergie ou d'un travail insuffisant. Sa considération ne présente aucun intérêt vraiment scientifique ; tandis que, dans des conditions de travail déterminées, les variations du rendement net R sont extrêmement utiles. Elles permettent de distinguer entre plusieurs sujets d'après leur degré d'habileté, d'entraînement, en un mot « d'utilisabilité sociale » (4).

Par ailleurs, la notion de rendement cesse de s'appliquer si les formes de l'activité musculaire sont d'ordre statique, et si l'homme se fatigue sans produire de travail mécanique au sens précis de ce mot. Ce sont, en définitive, les professions proprement musculaires, où il s'agit de déplacer de grandes résistances, qui s'évaluent en kilogrammètres d'après le rendement (4).

(1) Jules Amar, *le Rendement*, p. 73-74.

(2) *Comptes Rendus du Congrès de Physiologie de Paris*, juillet 1920.

(3) Ernest Solvay, *Formules d'Energétique*, p. 9, Bruxelles, 1906.

(4) On peut lire, au sujet du rendement mécanique de l'homme, un travail de J. S. Macdonald (*Proceed. Roy. Soc. London*, 1917, 1<sup>er</sup> janvier, série B, t. LXXXIX).

## CHAPITRE III

### EFFETS PHYSIOLOGIQUES DU TRAVAIL : FATIGUE

**148. Conditions d'une activité normale.** — Toute action musculaire s'accompagne d'effets physiologiques variés qui modifient l'intensité des phénomènes respiratoires, circulatoires et nerveux.

Ces modifications atteignent souvent un degré qui se marque par la fatigue ; c'est le cas normal. A un degré extrême, c'est le *surmenage*, véritable état pathologique.

Les degrés inférieurs de la fatigue sont tels que l'organisme retrouve son équilibre et se répare complètement par le repos qui suit la période de travail, et notamment par le calme et le sommeil de la nuit.

Il importe donc d'indiquer les effets physiologiques qui se manifestent dans un mode d'activité normale, telle que la puissance de l'homme n'en soit pas amoindrie.

**149. Effets du travail sur la respiration.** — Pour étudier le rythme du soufflet respiratoire et l'amplitude, la forme réelle des respirations, on a recours à la méthode graphique : un tambour simple ou double appuyé à la poitrine au moyen d'une courroie est mis en communication avec un tambour muni d'un style inscripteur : c'est le *pneumographe* (voir *Technique*, § 203). Ce dispositif donne rarement des tracés fidèles, à cause des déplacements du ruban thoracique, et de l'influence des muscles costaux plus ou moins contractés.

Nous avons donc imaginé de faire inscrire directement les *mouvements pulmonaires* au moyen de la soupape respiratoire, dérivée sur un tambour inscripteur. Il en résulte des tracés de *pression* ou *Tonogrammes*, toujours comparables entre

eux. Tonogrammes ou pneumogrammes montrent ceci :

Quand l'homme respire à l'état de repos, on note de 15 à 18 respirations par minute, chez l'adulte. Ce rythme varie avec l'âge. On a, en moyenne :

| AGE              | RYTHME  | AGE               | RYTHME  |
|------------------|---------|-------------------|---------|
| De 1 à 5 ans.... | 40 à 25 | De 15 à 25 ans... | 20 à 18 |
| 5 à 15 ans....   | 25 à 21 | 25 à 50 ans...    | 18 à 17 |

Sur les courbes l'expiration dure plus que l'inspiration (fig: 140 et 141), et les deux phases se succèdent assez régulièrement, dans un rapport de 2 à 1 environ.

Mais, quand on travaille, le rythme augmente et peut atteindre le

double de sa valeur : 25 à 35 respirations au lieu de 18 chez l'adulte, et à une température extérieure de 12 à

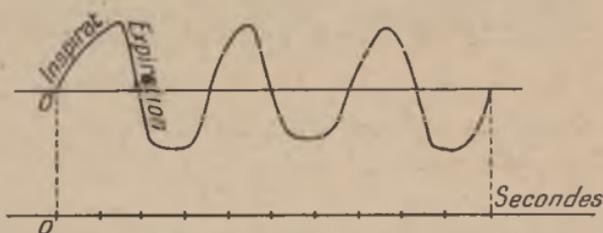


FIG. 140. — Courbes pneumographiques

15°. Le rapport Exp./Insp. va en diminuant. En outre la production des efforts est marquée par des inspirations prolongées et des expirations courtes: ce qui est l'opposé de la loi qui régit ces mêmes phases au repos.

Cette augmentation du rythme accroît la *ventilation pulmonaire*, laquelle tend à éliminer rapidement le gaz carbonique, véritable poison des organes neuro-musculaires (1).

Si le travail est mal conditionné, ou s'effectue avec une grande *puissance*, le gaz carbonique accumulé n'arrive pas à quitter les tissus à temps; le rapport  $CO_2/O_2$  diminue; il se produit ce qu'on appelle l'*essoufflement* (2). Tout ce qui peut gêner la respiration doit donc être évité pour que l'essouf-

(1) Jules Amar, *L'éducation respiratoire*; Paris, 1920.

(2) F. Lagrange (*Revue scientifique*, 1887, p. 718).

blement ne vienne pas mettre un terme au travail.  
Considérons le débit respiratoire par heure au cours d'un



Fig. 141. — Courbes tonographiques.

travail total de 45.000 kilogrammètres, effectué en cinq heures de suite sur le bicycle à frein (1) :

DÉBIT HORAIRE DE LA RESPIRATION

| JOURS                 | 1 <sup>re</sup> HEURE | 2 <sup>e</sup> HEURE | 3 <sup>e</sup> HEURE | 4 <sup>e</sup> HEURE | 5 <sup>e</sup> HEURE |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 <sup>er</sup> ..... | 842 l.                | 1.051 l.             | 1.074 l.             | 1.079 l.             | 1.080 l.             |
| 2 <sup>e</sup> .....  | 878                   | 1.139                | 1.167                | 1.187                | 1.188                |
| 3 <sup>e</sup> .....  | 896                   | 1.063                | 1.122                | 1.128                | 1.133                |
| Moyenne ....          | 872 l                 | 1.084 l.             | 1.121 l.             | 1.131 l.             | 1.133 l.             |

On voit que le débit atteint son régime à la deuxième heure.

Tandis qu'au repos il est de 500 litres par heure en moyenne, une production de 9.000 kilogrammètres par heure le porte à 1.100 litres. Un travail considérable fait passer dans les poumons de 1.500 à 2.000 litres par heure. Pour que de tels volumes d'air soient constamment purs, il est né-

(1) Jules Amar, *le Rendement...*, p. 64.

cessaire que les usines et les ateliers soient vastes et ventilés énergiquement.

Au point de vue strictement professionnel, il importe que le rythme des mouvements ne détermine pas l'essoufflement, cause d'une prompt fatigue; que le déploiement de force ne gêne pas l'expiration (*dyspnée*), et que les vêtements laissent aux parois thoraciques une grande liberté de jeu. Ce problème de la respiration est capital, et l'on peut déduire de l'irrégularité de son jeu un indice de fatigue.

**150. Effets du travail sur la circulation.** — C'est encore à la méthode

graphique que l'on a recours pour enregistrer les mouvements du cœur. Le tracé obtenu au *cardiographe* (*Technique*, § 203) donne les phases de la révolution totale du cœur : la *systole* qui est la contraction nécessaire pour chasser le sang dans les artères, la *diastole* qui est la phase de repos. La *pulsation* cardiaque correspond à la systole des ventricules (extrémité inférieure du cœur).

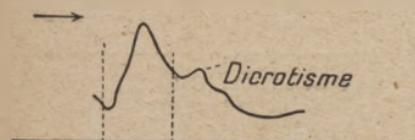


FIG. 143. — Tracé sphygmographique.

de forme tétanique. Sa durée représente plus du tiers de la période totale, la diastole couvrant les deux autres tiers (fig. 142).

La pulsation cardiaque s'observe au toucher et même à la vue, au niveau du mamelon gauche à peu près. Elle se renouvelle de 72 à 75 fois par minute chez l'adulte au repos.

Les battements du cœur ont pour conséquence les battements des artères, au même rythme. Sur la radiale, on perçoit la *pulsation* avec un retard de  $\frac{1}{5}$  de seconde sur le mouvement du cœur. Le tracé du *pouls* s'enregistre au moyen

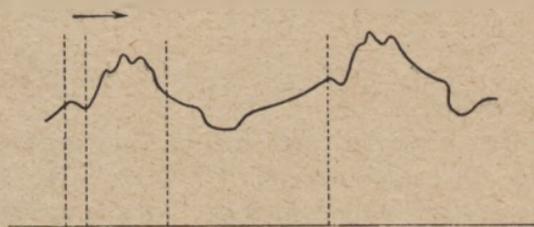


FIG. 142. — Tracé cardiographique.

Cette systole se traduit par une élévation du tracé, et des ondulations, au nombre de trois généralement, qui font supposer une contraction soutenue,

du *sphygmographe* (*Technique*, § 203) ; on y distingue, après la phase systolique, un petit ressaut dû à l'élasticité artérielle : c'est le *dicrotisme* (*fig. 143*) ; la portion ascendante correspond à l'impulsion cardiaque ; la portion descendante marque le passage du sang dans les vaisseaux capillaires. Quant au petit ressaut, il figure parfois en double ou en triple : c'est alors le *polycrotisme*. Il est plus saillant sous l'effet d'une température élevée, ou par le port de vêtements très chauds, comme à la suite de l'ingestion de boissons alcooliques.

Un autre élément important du pouls, c'est la *pression artérielle*.

Si on abouchait une artère à un manomètre, on mesurerait une pression de 120 millimètres de mercure, par exemple, pour l'artère humérale. Dans la pratique, on peut appliquer une petite poche en caoutchouc à l'endroit du pouls et l'y appuyer jusqu'à éteindre cette pression ; un manomètre relié à l'ampoule indiquera la pression : c'est le cas du *sphygmomanomètre de Potain*.

Avec plus de précision on atteint ce résultat en employant l'*oscillomètre de Pachon* (voir *Technique*, § 258).

Quand l'homme est au repos, on note :

| AGE            | PULSATIONS<br>PAR MINUTE | AGE               | PULSATIONS<br>PAR MINUTE |
|----------------|--------------------------|-------------------|--------------------------|
| 5 à 6 ans..... | 98                       | 14 à 19 ans.....  | 82 à 77                  |
| 6 à 8 .....    | 93                       | 19 à 80 .....     | 75 à 70                  |
| 8 à 14 .....   | 89 à 87                  | 80 ans et plus... | 79                       |

D'autre part, le rapport des durées entre la diastole et la systole est, en moyenne, de 2,50.

Et enfin, la pression artérielle s'élève avec l'âge : 13 à 14 centimètres de mercure entre dix et vingt ans, 17 à 19 centimètres entre vingt et quarante ans ; elle dépasse 20 centimètres à partir de cinquante ans (Potain) ; il s'agit, dans ces mesures, de la pression systolique, car la pression qui règne pendant la diastole est plus faible.

Quand l'homme effectue un travail, le rythme des pulsations augmente jusqu'à 100 et 120 par minute, suivant les cas ; il atteint un état de régime qu'il garde si le travail est régulier, normal. Ainsi sa valeur est de 112 à 114 pour un travail de 200.000 à 250.000 kilogrammètres en huit heures<sup>(1)</sup>. D'après Otto Weiss<sup>(2)</sup>, la limite extrême serait 167. Dans cette activité, l'organisme trouve la condition de sa résistance à la fatigue : le sang circule plus souvent, de sorte que, dans l'unité de temps, il passe 5 à 6 fois plus de sang dans le même organe<sup>(3)</sup>.

Voici quelques observations intéressantes sur le rythme du pouls<sup>(4)</sup>. Un sujet parcourt 38 mètres, *en palier*, à des vitesses croissantes ; son pouls, qui était de 75, devient successivement :

|               |    |    |    |       |
|---------------|----|----|----|-------|
| 84            | 85 | 88 | 90 | 90    |
| augmentant de |    |    |    |       |
| 9             | 10 | 13 | 15 | et 15 |

La durée du parcours a été, d'autre part :

|    |    |    |    |              |
|----|----|----|----|--------------|
| 30 | 28 | 26 | 19 | 18 secondes, |
|----|----|----|----|--------------|

nombre inversement proportionnels aux accroissements du rythme.

Gravissons une pente de 11<sup>cm</sup>,50 en parcourant 80 mètres. Le pouls battait 70 ; il marquera successivement :

|    |     |      |
|----|-----|------|
| 96 | 106 | 112, |
|----|-----|------|

soit une augmentation de

|    |    |    |     |
|----|----|----|-----|
| 26 | 36 | et | 42. |
|----|----|----|-----|

(1) Atwater et Benedict (*Bull.*, n° 136, p. 357 ; table 127).

(2) Otto Weiss (*Pflüger's Archiv.*, t. CXXIII, p. 341 ; 1908).

(3) Chauveau et Kauffmann (*Comptes Rendus Sc.*, t. CIV, p. 1126 et 1352 ; 1887).

(4) J. Amar, Observations inédites, et détails dans (*Journal de Physiol.*, 1914, p. 178).

Or la durée fut de

40                    33                    et                    30 secondes ;

ce qui vérifie la relation précédente, et met aussi en évidence le rôle de la rampe du terrain et de la vitesse. L'accroissement, pour une même durée de trente secondes, fut 42 au lieu de 9.

Enfin la phase systolique dans un fort travail se prolonge, et le rapport  $\frac{\text{diastole}}{\text{systole}}$  va en diminuant ; le dicrotisme s'atténue ; la pression artérielle, au contraire, augmente. Si, cependant, l'exercice effectué est violent, la pression faiblit considérablement. Dans un travail sur bicycle, de 10.000 kilogrammètres en 10 minutes, la pression arrérielle augmenta de 30 0/0, mesurée au Pachon.

Tous ces éléments, confrontés entre eux, renseignent sur le degré de fatigue de l'homme. Lavoisier a signalé, tout le premier, une relation remarquable entre la quantité de travail d'une part, le nombre de respirations et celui des pulsations d'autre part. Suivant cet illustre savant, la première quantité est proportionnelle au produit des deux autres<sup>(1)</sup>. Toutefois cette observation n'est pas rigoureuse ; nous l'avons vérifiée seulement quand le travail progressait doucement et n'entraînait point de fatigue. C'est une relation valable pour un mode d'activité modérée.

Dans ces conditions, en effet, l'oxygène consommé se règle sur la quantité d'air ventilé et de sang circulant, autrement dit sur leur produit.

Mais, en général, le nombre des respirations n'est point proportionnel à la ventilation des poumons ; il y a la profondeur, l'amplitude aussi à considérer.

L'expérience nous a montré<sup>(2)</sup> que l'accroissement des échanges gazeux du sang se fait d'après un coefficient variable avec la fréquence et le volume des respirations. C'est le coefficient hémato-pneïque. Il présente un grand intérêt théorique, et de nombreuses applications en biologie et en pathologie.

(1) Lavoisier, *Œuvres complètes*, t. II, p. 696 (édition officielle).

(2) Jules Amar (*Comptes Rendus Acad. Sc.*, 1919, t. CLVIII, p. 828, 957 et 1219) ; — *L'Éducation resp.*, p. 8 et suiv.

151. **Effets du travail sur la puissance musculaire.** — C'est un fait d'observation courante qu'un travail normal *entraîne* les muscles, provoquant une irritabilité plus grande de leurs fibres (§ 145), et réduisant, peut-être, la période de mise en train qui se trahit chez les débutants par « la raideur » des mouvements.

Avant de préciser la nature de l'entraînement musculaire, il faut signaler que, d'après différents auteurs, il s'accompagne d'un véritable gain de force. Ainsi, on fait travailler les bras jusqu'à la fatigue, en soulevant des haltères de 5 kilogrammes chacun au-dessus de la tête, on commence par cinq mouvements au rythme de quatre secondes; mais peu à peu on peut dépasser ce nombre, en suivant une progression croissante de 5 à 120 mouvements pendant soixantedix jours (1). D'après Kronecker et Cutter (2), le travail des jambes (marche) accroît la force des bras. Le mérite de toutes ces observations est qu'elles sont appuyées de chiffres. Mais la doctrine générale du gain de force des organes au cours ou à la suite d'une activité normale fut formulée au XVIII<sup>e</sup> siècle par Cheyne et Ramazzini étudiant des artisans (3), et ils ajoutaient la condition que ces artisans fussent convenablement nourris. C'était l'aurore de l'*hygiène industrielle*.

A cette influence de l'exercice on pourrait, sans doute, rattacher celle non moins favorable du *massage* intérieur dont les muscles sont l'objet, en conséquence de leurs mouvements répétés. Le *massage externe* produit un effet encore plus sensible, qui sera examiné plus tard (§ 167).

Quant à la nature même de l'entraînement (4), elle est à la

(1) G. Manca (*Arch. ital. Biol.*, t. XVII, p. 390); Henry (*Comptes Rendus Sciences*, t. CXII, p. 1473); W.-C. Lombard (*Journal of physiol.*, t. XIII, p. 1; 1892).

(2) Kronecker et Cutter (*Comptes Rendus Sciences*, t. CXXIX, p. 492; 1900).

(3) G. Cheyne, *Règles sur la santé et les moyens de prolonger la vie*, 1727 (traduit de l'anglais, édit. de Bruxelles); Bernardino Ramazzini, *De morbis artificum diatriba*, Modène, 1701 (traduit en plusieurs langues).

(4) Royer-Collard définissait l'entraînement, « une disposition à faire un certain travail » (*Bull. Acad. médecine*, 1842).

fois mécanique et physiologique. Mécanique parce que le travail diminue l'inertie propre de la fibre musculaire, physiologique — et c'est ici la véritable cause des faits observés — parce que le travail augmente l'irritabilité des muscles et des nerfs — comme l'inactivité les émousse et les conduit à l'atrophie et à la dégénération ; — parce que, d'autre part, il stimule les phénomènes circulatoires, l'action du sang et de la lymphe, au point de donner lieu à ce qu'on a appelé l'*hypertrophie fonctionnelle*. On voit alors s'accroître la masse des muscles, non par addition de nouvelles fibres, mais par épaissement des anciennes qui grossissent et mettent en réserve les matériaux azotés (1). L'albumine devient réellement, sous cet aspect final, un *aliment de force* (2).

L'économie de dépense qui résulte de ce progrès de la puissance musculaire a été envisagée à propos du rendement (§ 144).

**152. Effets du travail sur le métabolisme général.** — La véritable répercussion que l'exercice des muscles trouve dans l'organisme a un caractère absolument général : c'est le *métabolisme*, c'est ce que nous avons appelé travail physiologique (§ 62), ce sont toutes les réactions intimes des cellules qui augmentent d'*intensité*, à la façon d'une réaction chimique qui gagne en vitesse et « s'emballe » à mesure que s'élève la température.

Le travail accroît l'intensité des réactions cellulaires, comme la chaleur accroît la température d'un corps ; et nous avons vu (§ 133) qu'en laissant un organisme revenir au repos, ses réactions internes ou sa dépense diminuent suivant une loi analogue à la loi de Newton sur le refroidissement des corps (Loi du repos).

La progression de l'énergie dépensée est le corollaire d'une progression dans les opérations matérielles des organes. On constate, à la suite du travail, une *acidité* plus grande des

(1) Morpurgo (*Arch. ital. Biol.*, t. XXIX, p. 65 ; 1898).

(2) Zuntz et Schumburg (*Pflueger's Arch.*, t. LXXXIII, p. 557 ; 1901).

muscles, et on l'attribue (1) à une formation d'*acide lactique* (?); cette acidité est faible pour un exercice modéré, avec des intervalles de repos convenables. On observe, dans les urines, une élimination croissante de *phosphore*; cela est fort intéressant, car il existe des albumines phosphorées dans nos cellules, et Siegfried attribue à l'une d'elles, qui fait partie du noyau cellulaire, le pouvoir de se décomposer, donnant du phosphore, du gaz carbonique et de l'acide lactique; le centre des oxydations serait, dit-il, cette *nucléo-proteid* (2), car elle diminue dans les muscles par un travail de quelque durée, et leur acidité augmente. On voit aussi les oxydations des organes riches en noyaux être extrêmement intenses (3). Il y a donc, au foyer cellulaire, des réactions protéiques ne se manifestant pas par une excrétion d'urée, ainsi que de nombreuses expériences l'ont établi. A ces mêmes réactions il faut, sans doute, rattacher la présence dans l'urine d'un dérivé protéique, la *créatinine*, dérivé qui s'élimine quand les muscles se contractent *statiquement*, et non quand ils travaillent; c'est là un indice de la variété des phénomènes qui se passent dans la substance vivante (4), et du rôle que jouent les protéiques dans la production de la force musculaire.

Le travail augmente l'élimination d'eau par la peau et les poumons, en grande partie la *perspiration*. Un sujet qui, au repos, perd 881 grammes d'eau sous cette forme, a pu en perdre 2.475, 3.230, et même 7.381 grammes après avoir effectué en vingt-quatre heures un travail de plus en plus dur (5). Il en résulte un appauvrissement du sang en eau (6) et un besoin irrésistible de la ramener à sa concen-

(1) Dreser (*Centralblatt f. Physiol.*, t. I, p. 195, 1887).

(2) Siegfried (*Hoppe-Seyler's Zeitsch.*, t. XXI, p. 360; 1895-1896).

(3) Ralph Lillie (*Amer Journ. of Physiol.*, t. VII, p. 412; 1902); Bonanni (*Arch. di farm. sper. e sc. affini*, t. II, p. 8; 1902).

(4) Harkink (*C. R. Acad. sciences d'Amsterdam*, 30 sept. 1911); Pekelharing et Hoogenguyze (*ibid.*, 24 déc. 1909).

(5) Atwater et Benedict (*Bull.*, n° 136, p. 307 et suiv.). La perspiration élimine un peu d'urée; c'est une dépense matérielle de 0<sup>sr</sup>,80 à 1<sup>sr</sup>,40 de protéiques par jour, et qui peut s'élever à 4 grammes (Atwater).

(6) Kuthy, Zuntz et Schumburg, Lloyd Jones (*Journ. of physiol.*, t. VIII, 12).

tration normale : c'est la *soif*. La densité du sang s'élève légèrement.

L'évolution la plus utile à connaître au cours du travail est celle des *aliments*, non pas en tant qu'ils fournissent la dépense énergétique nécessaire, mais quant à leur *nature*; c'est de savoir quel aliment — graisse, protéique, hydrate de carbone — sera utilisé par le moteur vivant en activité dynamique.

Le métabolisme, au repos ou pendant le travail du sujet, porte sur les azotés dans une proportion sensiblement constante : 60 à 65 grammes par jour. Et il affecte les hydrates de carbone comme source d'*énergie libre* transformable en travail mécanique. En même temps il règle la température du corps au voisinage de 37°, puisque c'est une nécessité. Cette dépense de régulation paraît être à la charge des graisses, de préférence à tout autre aliment (§ 117).

L'activité des muscles accroît l'intensité de la circulation humorale <sup>(1)</sup> (sang et lymphé), provoque une vitesse des combustions qui peut élever la température générale de 1° environ <sup>(2)</sup> (§ 112), et favorise, dans une proportion sensible, les fonctions digestives.

Il n'est pas jusqu'aux centres nerveux qui ne trouvent profit dans ce mouvement général de la vie intérieure, et qui ne le manifestent par une disposition très accentuée à la rapidité des sensations et des actes. On a reconnu, par exemple, que la *sensibilité tactile* augmente; elle s'affine. C'est le cas des typographes notamment. Les hommes qui donnent beaucoup de temps aux occupations du cerveau éprouvent ce besoin de ranimer, par un travail physique, leur système nerveux et leur respiration, et toute la vie puissante des muscles suspendue presque par la vie concentrée de la pensée. Toute personne qui a l'habitude du travail est propre à réussir dans tous les genres professionnels, car ses muscles et ses nerfs se sont disciplinés pour cette fin multiple. Physiologiquement, le travail engendre l'aptitude au travail.

<sup>(1)</sup> Moussu (*Comptes Rendus Biologie*, 1900).

<sup>(2)</sup> Forel (*Revue scient.*, 1885); Marcet (*Archives Sc. nat. de Genève*, 1885); Wootthead (*Journ. of Physiol.*, t. XXIII : 1898-1899); Atwater et Snell (*loc. cit.*).

153. **Les limites du travail : la fatigue.** — On peut définir la fatigue en disant qu'elle constitue l'effet plus ou moins prochain du travail des moteurs, effet qui limite la durée de ce travail. Dans le cas des moteurs inanimés, la fatigue atteint les rouages, les ressorts, les pièces oscillantes ou tournantes, mais très lentement, et à raison d'altérations moléculaires d'ordre physique. Dans le cas des moteurs vivants, hommes et animaux, la fatigue ou diminue l'intensité de l'effort musculaire, ou réduit le raccourcissement du muscle. Nous verrons plus tard pourquoi. Mais il est à noter que le résultat de

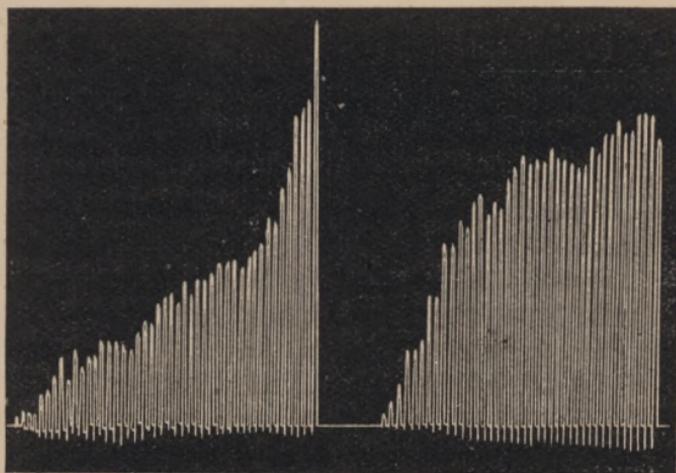


FIG. 144. — Tracés ergographiques.

la fatigue est une moindre aptitude au travail. Un tracé ergographique (§ 126) manifestera cette décroissance de la quantité de travail par contraction : la courbe sera descendante ; et, comme nous le savons déjà, elle descendra plus ou moins vite suivant le rythme des contractions et l'intensité de l'effort. Faisons observer, avec Imbert, que la fatigue musculaire *vraie* est tardive, tandis qu'elle se manifeste très vite à l'ergographe par suite de la sensation de *douleur* (1). Les conditions du travail ergographique du doigt sont, générale-

(1) A. Imbert (*Comptes Rendus Acad. Sciences*, 31 octobre 1910).

ment, pénibles, et les tracés (fig. 144) se ressentent autant de la douleur que de la vraie fatigue des muscles fléchisseurs.

Cette courbe de la fatigue varie peu, en général, chez le même individu ; on en a vu la forme se conserver pendant plusieurs années (1) ; mais parfois elle a subi des variations la rendant méconnaissable. Si l'on fait un examen attentif d'un

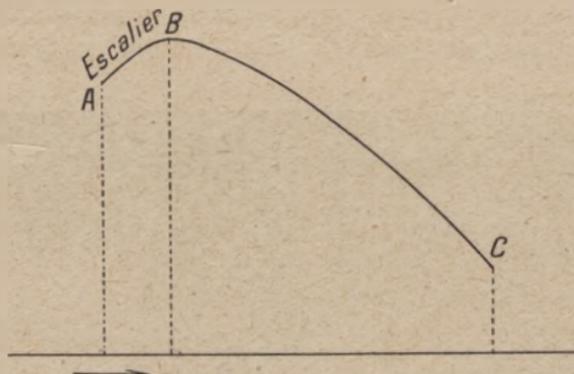


FIG. 145. — Schéma d'un ergogramme.

ergogramme, on reconnaîtra que sa portion initiale va en montant et forme ce que l'on a appelé l'escalier (fig. 145). Cet escalier serait dû à ce que l'excitation nerveuse produit, par sa fréquence, un *massage intérieur* des muscles et les entraîne bientôt à un fonctionnement plus régulier (Mosso, Richet) — ou, si l'on veut, à une *addition latente* des excitations, superposant ainsi leurs effets (Richet). Il est reconnu, du reste, que, par de *fortes excitations* électriques portées sur le nerf, le muscle se contracte en ne donnant pas d'escalier. Au lieu de la *hauteur* des contractions, si l'on considère leur *durée*, on retrouve ce même phénomène de l'escalier. Et cela prouverait que les impulsions nerveuses, cérébrales, se font plus rapides (2).

(1) A. Mosso (*Arch. ital. Biol.*, t. XIII, p. 123 ; 1890) ; A. Maggiora (*ibid.*, p. 187).

(2) L. Patrizi (*Reale Accad. Sc., lett. ed. arte in Modena* ; 9 juillet 1922).

Patrizi en conclut qu'il existe un véritable parallélisme des fonctions musculaire et cérébrale. Toutes deux obéissent aux mêmes lois, et les *Mnémogrammes* se peuvent tracer sur les ergogrammes. Les durées successives des actes mentaux iraient, dans certains cas, en diminuant.

Quant à la portion descendante de la courbe (BC), sa décroissance est d'autant plus rapide que les conditions mécaniques du travail<sup>(1)</sup>, ou l'état physiologique de l'homme sont plus défectueux. C'est ainsi qu'après un travail prolongé, la courbe ergographique se raccourcit rapidement. A cet égard on doit faire une remarque qui a sa valeur : si l'on se sert de la forme de l'ergogramme pour évaluer le *degré de fatigue professionnelle*, on doit éviter que la douleur s'ajoute à cette fatigue<sup>(2)</sup>; par exemple, un *effort très intense* peut avoir provoqué la douleur musculaire ou nerveuse au point que, en se mettant à l'ergographe, l'homme trahit une fatigue prononcée, avant qu'il ait fourni un travail journalier considérable.

Cette observation mérite d'être retenue à un autre point de vue : dans les arts manuels, il arrive que la fatigue se localise à un seul membre, au bras, à la jambe, aux doigts.

Le tracé ergographique pourrait donc ne traduire qu'une simple *fatigue locale*, quand ce n'est pas une douleur accidentelle.

Toutefois l'effet du travail est général; la fatigue s'étend à plusieurs groupes musculaires, lentement, progressivement.

« Les muscles de l'avant-bras se fatiguent plus rapidement et donnent une moindre quantité de travail mécanique à la suite de la fatigue générale produite par une marche de 10 kilomètres<sup>(3)</sup> »; car elle a épuisé les réserves d'*oxygène*.

Proportionner les éléments du travail pour que les muscles se contractent sans douleur et sans excès de fatigue locale, c'est le secret de la méthode du rendement maximum de l'ouvrier.

(1) Grandis (*Arch. per le scienze mediche*, t. XXVI, p. 269; 1902).

(2) La douleur est souvent la résultante d'un mauvais outillage et d'un manque d'habileté manœuvrière.

(3) A. Maggiora (*loc cit.*, p. 217).

Les ergogrammes révèlent aussi, par leurs formes et les quantités de travail qu'ils représentent, l'influence des facteurs si nombreux de l'activité humaine : nature de tel ou tel aliment, température extérieure, position du corps, grandeur de l'effort à produire, vitesse de marche, rythme des mouvements. En particulier, ils ont permis (§ 127) de déterminer les rythmes du travail économique, et, en quelque sorte, de l'infatigabilité musculaire, dont le cœur offre un curieux exemple.

Citons, à titre documentaire, cette ingénieuse observation de Galilée (1) (1564-1642) : « La fatigue du corps de l'animal découle, suivant moi, du fait qu'il emploie une de ses parties à mouvoir le tout ; vous trouverez, par contre, que le cœur est infatigable, parce qu'il ne fait que se mouvoir soi-même. » Ainsi Galilée admettait l'existence d'un effort optimum qui ménage l'organisme.

Dans les travaux *dits de force*, comme la *lutte*, les causes d'accidents sont fréquentes : « coups de fouet », luxations, déchirures ; ils demandent une grande résistance pour que l'homme ne cède qu'à la fatigue ; si au contraire cet homme présente des tares organiques, un accident a vite fait de limiter son activité ; il cesse de travailler sans être encore fatigué. L'état du cœur et des poumons doit suffire, aussi, aux exercices de force ; l'ondée sanguine, le débit respiratoire sont en proportion de l'effort. Le type de l'ouvrier capable d'un grand déploiement de forces musculaires est caractéristique : poitrine bombée, taille cambrée, périmètre thoracique supérieur à la moyenne, musculature saillante.

Dans les exercices de *vitesse*, la fatigue est due à la fréquence de l'excitation nerveuse, des *mises en train*. On ignore la nature exacte de cette fatigue, mais on soupçonne que les terminaisons des nerfs moteurs en sont le lieu d'élection. Ce genre de travail épuise l'énergie nerveuse : les sténographes, typographes, etc., se trompent et manquent des mots. Les hommes adonnés aux travaux de vitesse ne se développent pas musculairement ; ils ont le corps élancé et plutôt maigre : coureurs, danseurs, escrimeurs. Ils ont

(1) Galileo Galilée, *Opere*, édit. de Milan, 1811, t. XI, p. 558.

moins d'appétit que les autres hommes, en général. Malheureusement aucune règle précise ne peut être formulée pour évaluer le degré de fatigue nerveuse.

154. **Causes de la fatigue** (1). — Deux phénomènes, l'un physique, l'autre chimique, paraissent être les causes déterminantes de la fatigue. On remarque, d'une part, une altération des propriétés élastiques et de la cohésion des fibres musculaires; leur force élastique en est grandement diminuée; elles deviennent friables (2). D'autre part, la matière des muscles change de propriétés chimiques; elle est nettement *acide*, et dans son extrait alcoolique se trouvent plusieurs corps toxiques capables de donner la fatigue aux animaux dans le sang desquels on viendrait à les injecter (3). Les produits *ponogènes*, toxiques (de *πονως*, je m'efforce) diminuent l'*irritabilité* dans une proportion telle que les muscles ne réagissent plus qu'à des excitations nerveuses plus fortes; il s'ensuit une dépense excessive de mise en marche, origine d'une fatigue nouvelle (4).

On a presque toujours admis que les nerfs *sont infatigables*, au contraire des muscles, et même des centres nerveux importants, tels que le cerveau. Il semble que ce point de vue soit trop absolu (5); les fibres nerveuses se fatiguent cependant beaucoup moins que les cellules, et il est démontré que toute fatigue, sur quelque organe qu'elle se localise, correspond à la formation de substances toxiques dans l'organisme. Il y a plus: ces dernières augmentent par ce fait que les réserves albuminoïdes sont mises à contribution lorsque la respiration éprouve de la gêne (*dyspnée*), comme c'est le cas d'un homme fatigué. Et l'on a trouvé que, dans

(1) Lire un article intéressant de Lee, *The nature of muscle fatigue* (*Amer. Journ. of physiol.*, t. II, p. 11; 1905).

(2) Boudet de Paris, *De l'Elasticité musculaire*, Thèse, Paris, 1880; A. Mosso (*Arch. ital. Biol.*, t. XXV, p. 371; 1896); Joteyko (art. *Fatigue* du *Dictionnaire de Physiol.* de Ch. Richet, 1904).

(3) A. Mosso, *La Fatigue*, trad. de Langlois, Paris, 1894.

(4) Trêves (*Arch. ital. Biol.*, t. XXX, p. 1; 1898).

(5) J. Carvallo (*C. R. Sc.*, t. CXXVII, p. 774; 1900); Frœhlich (*Zeit. Allg. Phys.*, t. III, p. 468; 1904).

ces conditions, la quantité de poisons dans les muscles, le sang, les urines, s'accroît notablement (1).

Pour laver les tissus des poisons qu'ils renferment, le sang circule plus vite pendant le travail; il les porte aux *capsules surrénales* qui sécrètent l'*adrénaline* par quoi ils sont neutralisés (2); il les oxyde lui-même par l'oxygène qu'il contient.

L'état de repos est donc nécessaire pour que cette fonction de dépuración s'accomplisse; il permet, en outre, l'élimination du gaz carbonique accumulé dans le sang, par suite des combustions intra-organiques, gaz qui agit lui aussi comme poison musculaire pour abaisser la puissance de l'homme (3). Il permet enfin à l'irritabilité de se rétablir sous l'action du gaz oxygène (4).

La fatigue oblige au repos; elle en est la circonstance déterminante; elle progresse en même temps que le travail pour devenir, à un certain moment, une cause *d'arrêt ou d'inhibition*; elle est, à ce point de vue, une fonction de défense pour la santé.

**155. Résistance à la fatigue : endurance.** — La résistance à la fatigue se définit, généralement, par le produit  $F \times t$ , où  $F$  est l'effort dépensé, la charge soulevée, et  $t$  le temps. Ainsi, d'après Gaillard, on ne peut pas tenir les bras étendus pendant plus de dix-neuf minutes. Haughton et Nipher (5) ont obtenu la relation :

$$F^2 \times t = C^{10}.$$

Sur près de 80 sujets, nous avons observé que  $t$  varie de 20 à 78 secondes quand on porte à bras tendus deux *halteres* de 5 kilogrammes chacun pour ne les laisser tomber que de fatigue;  $t$  diminue d'autant plus vite que les intervalles de

(1) Oddi et Carulli (*Arch. ital. Biol.*, t. XIX, p. 384; 1893); Aducco (*Ibid.*, t. VIII, p. 238; 1887); Moitessier (*C. R. Biol.*, 1891, p. 573); Casciani (*la Riforma medica*, 1896).

(2) Abelous (Congrès méd. internat. de Rome, 1894, t. II). — Langlois : Thèse Paris, 1897.

(3) Lothak de Lotha (*Comptes Rendus Sciences*, août 1902).

(4) Spallanzani : *Mémoires sur la respiration*, p. 352, édit. 1803.

(5) Haughton et Nipher (*Proceed. Roy. Soc.*, t. XXIV).

repos sont plus courts. Ainsi le produit  $F^2 \times t$ , varie beaucoup d'un sujet à un autre, et suivant l'état antérieur; il a sa plus grande valeur chez les matelots, les débardeurs; les sujets doués de volonté sont plus capables d'*endurance* que les autres. Néanmoins, cela permet un *classement physique* très utile (voir *Organ. Physiol.*). D'après Chauveau, la résistance à la fatigue est fonction de l'élasticité musculaire; d'après Trèves, c'est un « tonus fonctionnel » de la moelle épinière, une réserve d'énergie nerveuse (1). Waller admet que les centres de la moelle sont les premiers à ressentir la fatigue (2), tandis que pour Joteyko ce sont les terminaisons motrices des nerfs (3). C'est, comme nous le disions, une tendance, chez la plupart des physiologistes, à transporter le siège de la fatigue dans ces points extrêmes des filaments nervo-moteurs. Mais les centres médullaires paraissent plus indiqués et les précèdent en tout cas, vu que, à la suite d'un travail fatigant, on éprouve des troubles de la *sensation de résistance*, troubles qui durent quelques heures.

Dans un travail de plusieurs jours, le maximum journalier est atteint par les ouvriers qui résistent le mieux à la *douleur*, car la sensation de douleur se mêle souvent à la sensation de fatigue. Une sorte de sensibilité émoussée prédispose les hommes de certaines professions à ne pas souffrir des efforts plus ou moins douloureux qu'ils produisent.

Si donc on voulait se faire une idée de la résistance à la fatigue d'un sujet, on devrait considérer la somme de travail ou la dépense d'énergie effectués chaque jour, bien plutôt que l'effort statique  $F t$ . Ce serait l'*endurance professionnelle*, c'est-à-dire utile. Mais ni cette notion statique, ni la notion dynamique de l'*endurance* ne se rapportent à l'état de fatigue extrême ou de *surmenage*, lequel sort des limites physiologiques et dénote une organisation barbare.

**156. Fatigue nerveuse : activité intellectuelle.** — L'activité des muscles nécessite une dépense d'énergie qui s'évalue en calories et une consommation équivalente d'oxygène. L'acti-

(1) Trèves (*Arch. ital. Biol.*, t. XXX, p. 1-34; 1898).

(2) A.-D. Waller, *The sense of effort* (*Brain*, t. XIV, p. 179; 1892).

(3) J. Joteyko (*Travaux Institut Solvay*, III, fasc. 2; 1900).

tivité des nerfs est chose encore très obscure. Pourtant, comme tous les tissus, la *matière nerveuse respire*. Thunberg, de Lind, imagina un petit appareil : le *microrespiromètre*, grâce auquel il reconnut que les filaments des nerfs consomment dans l'*air pur* et à la température de 20° : 22<sup>mm</sup>3,20 d'oxygène par gramme et par heure, et ils exhalent 22 millimètres cubes de gaz carbonique (1). Ces échanges gazeux sont un peu plus actifs quand le tissu est en place, sur l'animal vivant (2), au milieu des liquides nourriciers. Même en admettant une dépense d'oxygène double, soit 45 millimètres cubes par gramme-heure, on aurait pour les 1.700 grammes que représente la masse nerveuse d'un adulte, et en vingt-quatre heures :

$0^{\text{cc}},045 \times 1.700 \times 24 = 1.836$  centimètres cubes,  
équivalents à :

$$1,836 \times 5^{\text{Cal}},05 = 9^{\text{Cal}},27.$$

Cette production calorifique est environ les  $\frac{4}{1.000}$  de celle de l'organisme entier pris au repos. On comprend qu'il ait été difficile de constater une élévation sensible de la température du cerveau ou des nerfs quand on les a excités électriquement (3).

Benedict et Carpenter (4), après Atwater (5), se sont servi de la chambre calorimétrique pour mesurer l'augmentation de production calorifique de l'homme qui fait des opérations intellectuelles difficiles. Ils ont obtenu un excès de 1<sup>Cal</sup>,32 pendant trois heures, environ 4 p. 1000 également.

Le détail des observations est celui-ci :

(1) Thunberg (*Centralblatt f. Physiol.*, t. XVIII, p. 553; 1907; t. XXII, XXIV, XXIX et XXX; 1909, 1911 et 1913). Sur le cerveau de chien, Battelli et Stern trouvent des chiffres plus élevés (*Journ. de physiol.*, 1907). De même Winterstein et son élève Unger (*Clbl. f. Physiologie*, 1908, t. XXI, p. 862; — *Bioch. Zeitsch.*, 1914, t. LXI, p. 103).

(2) A. Waller, *Leçons sur l'Électricité animale*. Paris, 1899.

(3) De Boeck, Thèse de Bruxelles, 1893; Cremer (*Sitzungsber. d. Gesellschaft. f. Morph. und Physiol. z. München*, 1896); A. Mosso (*Arch. ital Biol.*, t. XVIII et XXII).

(4) Benedict et Carpenter (*Bull.*, n° 208, p. 45-100; 1909).

(5) Atwater et Benedict (*Bull.*, n° 136, p. 101 et 124).

| MOYENNE DE 22 EXPÉRIENCES            | REPOS                | ACTIVITÉ<br>INTELLECTUELLE |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------------|
| Chaleur dépensée par heure.....      | 98 <sup>c</sup> ,43  | 98 <sup>c</sup> ,80        |
| Eau vaporisée.....                   | 37 <sup>sr</sup> ,80 | 39 <sup>sr</sup> ,23       |
| Oxygène consommé.....                | 25 ,86               | 27 ,30                     |
| Gaz carbonique excrété.....          | 32 ,76               | 33 ,42                     |
| Température du corps (variations)... | 0° 980               | 0° 989                     |
| Pulsations par minute.....           | 74                   | 79                         |

« Il résulte des données accumulées dans cette série d'expériences, sur les effets du travail intellectuel sur le métabolisme, que le nombre de pulsations s'est accru légèrement ainsi que la température du corps, que l'élévation de la quantité d'eau vaporisée a été de 5 0/0 environ, celle du gaz carbonique excrété de 2 0/0, celle d'oxygène de 6 0/0 à peu près, et celle de la chaleur produite de 0,50 0/0, tout cela dans des conditions d'effort cérébral soutenu, comme celles des étudiants pendant les périodes d'examen...

« Nous sommes très fortement d'avis que les résultats obtenus au cours de ces expériences n'indiquent pas que l'effort cérébral ait exercé une influence positive sur l'activité métabolique (1). »

Des expériences inédites sur la dépense d'oxygène d'étudiants se livrant à des opérations mentales nous ont conduit à la même conclusion. Et nous pouvons dire que l'activité intellectuelle ne correspond pas à une dépense énergétique mesurable, surtout que le repos des muscles doit la masquer.

En considérant cette faible dépense calorifique, nous sommes étonnés, évidemment, que l'activité intellectuelle entraîne la fatigue, une fatigue indéniable, plus marquée souvent que celle des muscles. Parce qu'on ne voit pas la forme de cette activité, il ne s'ensuit pas qu'elle ne puisse donner lieu aux déchets toxiques qui se rencontrent dans le travail des muscles (Mosso). Elle ne va pas sans un échange matériel et une dissociation de diverses substances, généralement *phosphatées*; elle détermine même, semble-t-il, la

(1) Benedict et Carpenter (*Bull.* n° 208, p. 100; 1909).

fatigue des terminaisons nerveuses qui prennent contact avec les muscles, c'est-à-dire qu'elle rend le travail plus pénible, parfois douloureux. L'excitabilité des centres nerveux est alors amoindrie; ils présentent une inertie croissante. C'est ainsi que la *pensée* a plus de force le matin que le soir (1). On a mesuré la sensibilité de la peau au moyen de l'*esthésiomètre* et trouvé, sur les enfants des écoles, qu'elle diminue progressivement au cours d'une journée d'études (2) ou d'une méditation prolongée (§ 249). Tandis que le *seuil* (distance liminale) est de 3,5 millimètres sur la lèvre inférieure les journées d'études, il est de 1 le dimanche, jour de repos. Chez les jeunes ouvriers (apprentis), la différence est, au contraire, peu appréciable. Il faut, enfin, tenir compte de l'attention, de la réflexion, qui mettent en jeu divers muscles de la face dont la contraction soutenue est une cause de fatigue. On peut affirmer, sans grande hardiesse, que ces contractions musculaires ont induit en erreur plusieurs expérimentateurs, qui ont pu observer une élévation de la température cérébrale (Mosso, Gley), ou des échanges gazeux plus actifs lorsque les centres nerveux sont excités soit normalement (3), soit par une absorption de liquides (essence d'absinthe) provoquant des accès d'épilepsie (4).

Quoi qu'il en soit de sa nature, la fatigue nerveuse est réelle et se manifeste en proportion du degré d'attention que l'on exige de l'homme. On peut dire que le travail est d'autant plus pénible qu'il sollicite davantage les facultés intellectuelles, et d'autant plus facile qu'il est plus automatique. L'intervention de la pensée n'est pas, pour l'organisme humain, un facteur d'économie.

La fatigue cérébrale diminue non seulement la sensibilité tactile, mais aussi la sensibilité générale; on réagit plus lentement aux excitations; l'*équation personnelle* augmente

(1) A. Mosso, *Les exercices physiques et le développement intellectuel*, trad. Jaquet, 1904; Binet et Henri, *La Fatigue intellectuelle*.

(2) Griessbach, *Energetik und Hyg. d. nerven-systems in die Schule*, Leipzig, 1895. — R. Abelson, *Mental Fatigue* (Thèse de l'Univ. de Rennes, 1909).

(3) Becker et Olsen (*Die Umschau*, n° 19; 1912; et *Skand. Arch. f. Phys. id.*, t. XXXI, p. 81; 1914).

(4) Hill et Nabarro (*Journal of Physiology*, t. XVIII, p. 218; 1895).

et l'aptitude au travail s'affaiblit. Il est bon de varier les occupations, afin que les mêmes centres nerveux ne se trouvent pas constamment sollicités, car ils fonctionnent d'une manière *alternante*. S'il s'agit de l'ouvrier, on l'appliquera souvent à des travaux différents, on lui donnera des distractions, pour que ces émotions d'un autre genre le reposent de l'activité uniforme de l'atelier ou de l'usine. Ces avantages, joints à la restauration des forces physiques, doivent être assurés par le *repos hebdomadaire* qui, de tous temps, est apparu comme une loi physiologique souveraine, exprimant la volonté divine. Le rôle de la divinité servait à vaincre la résistance des maîtres. Ainsi le rétablissement des énergies nerveuse et musculaire résulte du repos. Après un repos de vingt-quatre heures, on ne perd pas son entraînement, le démarrage est rapide, à moins d'avoir fait un mauvais emploi de cette journée d'inaction. A cause des repos nécessaires et de la *reserve d'oxygène* disponible, l'exercice des deux bras (sur deux ergographes par ex.) produit *moins de travail* que si on les emploie l'un après l'autre : 30 0/0 de moins aux dires de Claparède.

En résumé, la fatigue est d'essence unique ; c'est principalement une intoxication. « La plus grande joie que j'aie ressentie au cours de mes études sur la fatigue, écrivait Mosso, c'est d'avoir découvert que la dépression des forces, déterminée par l'action de la pensée ou par celle du mouvement, produit des effets identiques. Soit que l'homme travaille avec les muscles, soit qu'il travaille avec le cerveau, la nature de la fatigue est toujours la même, parce qu'il n'existe qu'une force agissante : *la force nerveuse* (1). »

(1) A. Mosso (*loc. cit.*, p. 216). — W. Weichardt, *Ueber Ermüdungsstoffe*. Stuttgart, 2<sup>e</sup> éd. 1912. On trouvera, dans *Organis. physiol.*, p. 77 et suiv., un ensemble de signes objectifs de la fatigue et du surmenage. On s'est dispensé de les reproduire ici.

Consulter également : Smith (*Brit. J. of Psychol.*, London, sept. 1916, t. VIII, n° 3) ; et sur la « *Fatigue industrielle* », un art. de St. Kent, dans (*Nature* du 13 sept. 1917 ; t. C ; n° 2498), et un autre de Bayliss (*ibid.*, 7 février 1918) ; enfin A. Durig, *Die Ermüdung* : Wien, 1916 ; et Ed. Claparède (*Archives Sc. phys. et nat.*, 1917, t. XLIV, p. 71).



## LIVRE IV

# L'HOMME ET LE MILIEU

---

## CHAPITRE I

### LE MILIEU INTÉRIEUR.

**157. Milieu intérieur.** — Claude Bernard avait défini le *sang* en l'appelant « le milieu intérieur ». Effectivement, le sang distribue aux tissus l'aliment et l'oxygène et emporte les déchets de la combustion intra-organique ; les cellules de notre corps vivent en lui comme dans une atmosphère. Mais aussi tout ce qui diminue les éléments utiles de ce milieu intérieur, et à plus forte raison toutes les substances capables de le vicier, ont un retentissement profond dans l'organisme. A ce point de vue nous considérerons la *quantité* et la *qualité* de l'aliment, ainsi que le rôle des *nervins* et des produits toxiques. La *vie* elle-même est une incessante évolution dont la rapidité dépend de différents facteurs : l'activité variable des sujets, leur âge, leur sexe. Autant de problèmes distincts qui mériteraient une étude détaillée dont ce livre n'offre nullement le cadre. On s'adressera donc avec plus de profit aux traités d'Hygiène (1). Nous résumerons seulement les notions concernant les rapports du travail et du milieu intérieur de l'homme.

**158. Influence de l'aliment.** — *L'alcool.* — Nous avons déjà exprimé l'idée que, différente en cela des moteurs usuels, la

(1) Nous recommandons particulièrement : Th. Oliver, *Occupations, from the social, hygienic and medical points of view* : Cambridge, 1916.

machine vivante ne s'alimente pas de tout combustible, quel qu'il soit. Son combustible, à elle, doit réaliser la condition fondamentale d'être une *substance de réserves possible*. En un mot, le *pouvoir calorifique* ne définit point l'aliment (voir § 97).

Examinons, dans cet esprit, *l'eau*. C'est une partie intégrante de nos tissus, le liquide indispensable aux opérations physico-chimiques de la cellule. L'organisme lutte pour en maintenir le taux invariable dans le sang; il n'y a chute sensible que par effet de l'inanition <sup>(1)</sup>. Elle possède un grand pouvoir stimulant sur les sécrétions digestives et le brassage des aliments <sup>(2)</sup>. Et son action *diurétique* n'est point douteuse. L'eau est donc la *boisson naturelle* des êtres vivants. En est-il de même des boissons alcooliques, de *l'alcool en général*? Celui qui entre dans les liquides fermentés est *l'alcool éthylique*, celui des *eaux-de-vie*; il a pour formule  $C^2H^6O = 46$  grammes, et sa chaleur de combustion atteint  $7^{Cal},067$  par gramme <sup>(3)</sup>. A la dose de 1 gramme par kilogramme de poids d'un homme, il n'est pas toxique. C'est donc, pour un adulte, à la dose de 65 à 70 grammes par jour qu'il convient d'en rechercher les effets. Or, théoriquement, il n'est pas de transformations chimiques qui puissent, de l'alcool, dériver un sucre ou une autre espèce vraiment alimentaire. Son rôle dans *l'énergie mécanique* des muscles est de ce fait douteux. Mais il pourrait brûler directement et fournir de *l'énergie calorifique*. Cela, rien ne paraît l'empêcher; et si, réellement, cet apport calorifique avait lieu, l'alcool serait un véritable *aliment d'épargne*, en ce sens que les aliments qui brûlaient dans un « but » de thermogenèse seraient dispensés de ce service.

L'alcool serait-il donc un aliment d'épargne? Dans une ration d'entretien, pourrait-il prendre la place des hydrates de carbone, des graisses ou des protéiques? Voici comment Atwater et Benedict <sup>(4)</sup> répondirent à la question: Le sujet,

(1) Terroine (*Biol.*, 28 mars 1914).

(2) Mattill et Hawk (*J. Amer. Chem. Soc.*, 1912, t. XXXIII, p. 1978) — Carlson, Orr et Brinkmann (*Amer. J. of Physiol.*, 1914, t. XXXIII, p. 86).

(3) Atwater et Benedict (*Bull.*, n° 63, p. 54; 1899).

(4) Atwater et Benedict (*Bull.*, n° 69, p. 28 et suiv.: *The physiological aspects of the Liquor Problem...*, part II, p. 149 et suiv.).

âgé de trente et un ans, et pesant 68 kilogrammes, reçoit 72 grammes d'alcool (l'équivalent d'une bouteille de vin du Rhin) dans une infusion de café (650 grammes), et de la manière suivante : 11<sup>sr</sup>,50 au petit déjeuner, 7<sup>sr</sup>,60 à dix heures et demie, 19<sup>sr</sup>,10 à dîner, et 7<sup>sr</sup>,60 à quinze heures et demie, 19<sup>sr</sup>,10 à souper et 7<sup>sr</sup>,60 le soir. Déduction faite de 3 grammes environ qui furent éliminés en nature par les poumons, les reins et la peau, la dose équivalait à 491 *Calories*. Elles fut substituée à une partie de la ration. Les savants américains observèrent au calorimètre 2.283 *Calories*. Le calcul relatif au métabolisme de la ration contenant l'alcool conduisit à 2.268 *Calories*. Ces résultats concordent sensiblement. Dans une autre expérience, on eut 2.394 *Calories* et 2.434 *Calories*.

En conséquence, tout l'alcool ou à peu près a brûlé dans l'organisme. Et l'on remarque que le sujet *engraisse légèrement*. Aussi Atwater et Benedict ont-ils conclu « que l'énergie cinétique résultant de l'oxydation équivaut parfaitement à celle de la combustion de l'alcool, et que ce dernier sert à protéger les protéiques et les graisses contre l'oxydation<sup>(1)</sup> » Aucun raisonnement ne prévaut contre ce fait que l'énergie liée, calorifique, peut avoir l'alcool pour origine dans les cellules vivantes.

Des expériences entreprises par Chauveau<sup>(2)</sup> parlent dans le même sens, à savoir que l'alcool est à même de se substituer aux aliments qui composent une ration, *dans une certaine mesure*; mais cette substitution, quant à la production de *travail mécanique*, est un désavantage. Il faut donc corriger les conclusions d'Atwater et de tant d'autres<sup>(3)</sup> en spécifiant que, dans une ration de travail, l'alcool ne peut, en aucune façon, remplacer des hydrocarbonés. S'il agit sur le travail des muscles, c'est indirectement, par une exaltation nerveuse *momentanée*.

(1) *Loc. cit.*, p. 112.

(2) A. Chauveau (*Comptes Rendus Acad. Sciences*, t. CXXXII, p. 65, 110 : 1901).

(3) Rosemann (*Pflueger's Arch.*, t. LXXXVI, p. 327 ; 1901 ; — t. XCIV, p. 557 ; 1903) ; *Oppenheimer's Handb. Bioch.*, 1911, IV, 1, p. 413 ; — Durig et Brezina (*Biochem. Zeitsch.*, 1913, t. L, p. 296).

Remarquons, d'ailleurs, que la *glycérine* (alcool triatomique) remplit, à petites doses, une fonction d'épargne à l'égard des graisses et des hydrates de carbone <sup>(1)</sup>; il ne serait même pas étonnant qu'elle fût une source d'énergie mécanique, attendu qu'un sucre pourrait en dériver.

L'emploi de l'alcool en boisson, très modérément, n'est donc pas condamnable en principe. C'est un stimulant de la muqueuse digestive, provoquant le flux des sucs gastrique <sup>(2)</sup> et pancréatique <sup>(3)</sup>, c'est aussi un stimulant général des opérations nutritives: il favorise la croissance des organismes <sup>(4)</sup>. Enfin, c'est un excitant de la fibre musculaire, probablement par voie nerveuse; il en augmente la puissance et en retarde la fatigue <sup>(5)</sup>, au moins quelque temps <sup>(6)</sup>.

159. **Les spiritueux.** — Malheureusement, on abuse de l'alcool; on dépasse bien vite la dose physiologique pour arriver à la dose toxique. Tous les effets que l'on constate alors sont désastreux. L'organisme ne peut se défendre, car il n'élimine, par l'urine, la transpiration et la respiration, que de faibles quantités d'alcool, et très lentement <sup>(7)</sup>. L'activité mécanique des muscles élève un peu cette élimination <sup>(8)</sup>, mais sa valeur ne sera jamais suffisante pour retarder l'action terrifiante de ce poison sur les *centres nerveux*. A doses assez fortes, supérieures à 100 grammes par jour, l'alcool est un *stupefiant*, un corps toxique très pénétrant. Il l'est sou-

(1) Munk (*Pfluegers Arch.*, t. XLVI, p. 303; 1890); Leo (*ibenda*, t. XCIII, p. 269; 1903).

(2) Radzikowski (*ibid.*, t. LXXXIV, p. 513; 1901).

(3) Gizelt (*Centralb. f. Physiol.*, t. XIX, p. 851; 1905; *Pfl. Arch.* t. CXI, p. 620; 1906).

(4) G. Pierrotti (*Giornale della Reale Soc. ital. d'Igiene di Milano*, 1906).

(5) Lee et Salant (*Amer. Journ. of Physiol.*, t. VIII, p. 61-74; 1903); contre, voir Benedict et Dodge (*Proceed. Acad. Sc. Washington* déc. 1915, 1, p. 605).

(6) E. Destrée (*Journ. méd. de Bruxelles*, 1897, p. 537), L. Schnyder (*Pfluegers Arch.*, t. XCIII, p. 451; 1903).

(7) Gréhan et Nicloux (*Comptes Rendus Biologie*, 1899, 1900, 1903).

(8) W. Woetz et A. Baudrexel (*Pfluegers Arch.*, t. CLXII, fasc. 1 et 2: 1911).

vent autant par lui-même que par les essences auxquelles on l'associe dans les « spiritueux ». Ces essences sont les unes *convulsivantes*, les autres *stupefiantes*. Dans les premières rentrent, par ordre décroissant de leur puissance, les essences de sauge, d'absinthe, d'hysope, de romarin, de sarriette, de fenouil, de marjolaine, de calament, de basilic. Dans les secondes, on classerait le thym, le serpolet, la lavande, la rue, la mélisse.

Ainsi 5 centigrammes d'essence de sauge, introduits dans le sang d'un chien de 7 kilogrammes, lui donnent trois crises d'épilepsie; 25 centigrammes le tuent rapidement. L'homme traduit ces effets avec une sensibilité plus grande: tandis que 3 grammes d'essence d'hysope sont nécessaires pour donner des convulsions à un chien de 7 kilogrammes, 2 grammes suffiraient à un homme vigoureux, à jeun <sup>(1)</sup>.

D'après Triboulet et Mathieu <sup>(2)</sup>, il faudrait, pour tuer un chien de 7 kilogrammes, lui donner *par kilogramme* :

|                                    |                     |
|------------------------------------|---------------------|
| Cognac vrai.....                   | 15 <sup>cc</sup> ,4 |
| Kirsch.....                        | 15 ,5               |
| Eau-de-vie de cidre.....           | 15 ,4               |
| — de marc.....                     | 14 ,7               |
| — de prunes.....                   | 14 ,7               |
| Alcool de tête (mauvais goût)..... | 15 ,1               |

Cafferata <sup>(3)</sup> ajoute les données suivantes :

|               |                 |
|---------------|-----------------|
| Pernol.....   | 7 <sup>cc</sup> |
| Whisky.....   | 10              |
| Bières.....   | 18 ,0           |
| Anisette..... | 18 ,5           |
| Gin.....      | 20              |
| Kummel.....   | 24 ,5           |
| Vins.....     | 75              |

(1) Cadéac et Meunier (*Comptes Rendus Biologie*, 1891, p. 213 et *passim*). On trouvera, dans *Organisation physiologique*, p. 116 et suiv., l'exposé des effets de l'alcoolisme sur les organes, dans l'*artério-sclérose* et la vieillesse précoce.

(2) Triboulet et Mathieu (*Biologie*, 1904).

(3) Juan Cafferata (*Rivista Univers. Cordoba*, 1919, VI, n° 4).

En même temps que poisons nerveux, les boissons alcooliques diminuent la puissance musculaire très nettement <sup>(1)</sup>, après simple ingestion dans l'estomac. Par les lésions qu'elles déterminent dans les organes, la dépression générale des forces <sup>(2)</sup>, leur usage devrait être interdit sévèrement.

En fait, les boissons enivrantes constituent une source de distraction, au sens vrai de ce mot; elles chassent les soucis qui assiègent l'esprit de l'homme, elles l'abrutissent momentanément: c'est l'arme des faibles.

Tous les peuples ont leurs boissons favorites: *koumys* (lait de jument fermenté) des Turcs et des Mongols, bière de millet ou d'éleusine des nègres, vin de sagou des Malais, pulqué ou vin d'agave des Mexicains, vin de poivrier des Polynésiens, vin de palmiers des Arabes, *betsabetsa* (jus de canne à sucre fermenté) des Malgaches, etc.

La conclusion des faits qui précèdent est que l'alcool pourrait être un aliment thermogène; il n'est pas un aliment dynamogène. De plus, à doses relativement faibles encore, il constitue un danger pour l'économie humaine. L'ouvrier a donc tout profit à s'en passer complètement, car c'est lui — la statistique le démontre (§ 362) — qui a tendance à en abuser <sup>(3)</sup>.

**160. Aliments d'épargne.** — L'alcool à faibles doses est donc un aliment, et un aliment d'épargne vis-à-vis de l'une quelconque des trois espèces alimentaires.

Ce même caractère va-t-il se retrouver sur le café, le thé, la noix de kola, etc.?

Voici les faits que nous pouvons invoquer à ce sujet <sup>(4)</sup>.

Trois personnes, adultes, effectuent un travail de 50.000 kilogrammètres chacune sur le bicycle à frein; elles sont

(1) Gréhant et Quinquaud (*Comptes Rendus Biologie*, 1891, p. 416). — Athanasiu (*C. R. Ac. Sc.*, 22 mars 1920).

(2) De Boeck et Günzburg (*Bull. Soc. méd. mentale Belg.*, 1899, p. 307); Kurz, Büdin, Mayer, etc. (*Psych. Arbeiten*, t. III et IV; 1900-1901).

(3) Consulter Louis Jacquet, *L'Alcool*, préface de G. Clémenceau, Paris, 1913, chez Masson.

(4) Jules Amar, *Le Rendement de la machine humaine*, p. 76.

mises à la ration d'entretien. Puis on substitue isodynamiquement dans cette ration, 5 grammes de *thé sec* (pris en infusion), à du pain. L'équilibre se trouve respectivement réalisé, avec une économie de 125<sup>Cal</sup>,50 ; 157<sup>Cal</sup>,56 et 101<sup>Cal</sup>,59 sur la dépense journalière.

Cette économie est constante pendant plusieurs jours.

De nombreuses populations (Russes, Marocains) font un continu usage de thé fortement sucré. D'après nos propres observations, le Marocain de moyenne condition absorbe, par jour, quinze à vingt tasses de thé, représentant près de 12 grammes de thé sec et 400 grammes de sucre. Et sa force et sa résistance à la fatigue sont remarquables.

Les Afghanistans emploient un succédané du thé, le *Catha edulis*, qui leur permet de faire de longues marches de nuit et d'accroître leur force musculaire (1).

161. Le *café*, introduit en fusion et isodynamiquement à du pain, dans la ration de travail de deux sujets qui produisent 52.147 kilogrammètres chacun, a donné une économie de 139 Calories et 246 Calories. On ingérait 30 grammes de café torréfié (2).

A côté de ce rôle d'épargne, il paraît certain que le café, pris en petite quantité, stimule les fonctions musculaires (3) et nerveuses, provoque les sécrétions digestives et active le métabolisme général.

162. Le *cacao*, qui contient 0,16 0/0 de *théine* et sert à fabriquer le chocolat, agit moins énergiquement que le café ; mais il est plus nutritif.

La noix de *kola* est plus riche en caféine : 2 à 3 0/0, et son action favorable, sur le travail musculaire et le travail intellectuel, est des plus marquées.

« Le soir, écrit M. Chevalier, le savant explorateur du Congo et de la Côte d'Ivoire, lorsque nous avions à veiller, non seulement nous y parvenions facilement en mâchant une noix de kola, mais

(1) J.-F. Oven (*Journ. of the Soc. of chem. ind.*, t. XXIX, p. 1091, 30 sept. 1910).

(2) Jules Amar, *loc. cit.*

(3) F. Ranson (*Journal of Physiol.*, t. XLII, p. 144 ; 1911).

l'activité intellectuelle était stimulée, et les pensées se précisaient au courant de la plume... Le travail accompli, nous nous endormions aussi facilement que d'habitude, et nous ne ressentions aucune dépression le lendemain (1). » La fatigue est retardée, et l'endurance de l'homme en est sensiblement accrue (2).

163. Le *piment* (*Capsicum annuum*) et l'acide butyrique se sont montrés aliments d'épargne : 4 piments, introduits dans une ration d'entretien, ont produit une économie de 298 Calories. Si l'on ne diminue pas la valeur de la ration, le sujet voit son poids augmenter de 400 grammes par jour en moyenne. Et pourtant l'apport énergétique de ces quatre piments équivaut à 21 Calories seulement.

Enfin, le *beurre ranci*, représentant 4<sup>gr</sup>,21 d'acide butyrique, a permis à un sujet, qui produit 48.290 kilogrammètres et dépense 3.576Cal,64, de réaliser une économie de 485 Calories.

Ces quelques expériences démontrent l'effet général des aliments nervins sur la dépense : une *protection* sensible à l'égard des réserves organiques dont ils semblent modifier le coefficient de transformation énergétique.

On examinerait, au même titre, les *condiments* : sel de cuisine, vinaigre, essence de poivre, etc., mais on est porté à croire qu'ils abaissent un peu la puissance musculaire (3).

164. **Jeûne et inanition. Croissance.** — L'insuffisance de la quantité d'aliments, l'état de jeûne même, ne réduisent pas la dépense des vingt-quatre heures d'une façon appréciable : 5 à 6 0/0 le premier jour, d'après les mesures d'Atwater, puis la valeur tend à être constante. En un mot l'organisme manifeste une certaine indépendance à l'égard de l'apport extérieur en aliments... si ce dernier se trouve réduit ou supprimé pour peu de temps.

Il n'en va plus de même lorsque *l'inanition se prolonge*. Dans ce cas, les échanges respiratoires, le métabolisme nutritif s'abaissent progressivement. Aux Instituts Carnegie,

(1) A. Chevalier et Perrot, *Les Kolatiens*, p. 471 ; Paris, 1911.

(2) W. Barr (*Ther. Gazette*, t. XX, p. 221 ; 1896).

(3) Féré, *Travail et Plaisir*, 1904 : Paris, chez Alcan.

Benedict a pu expérimenter les effets d'un jeûne de trente et un jours sur un médecin de quarante ans, lequel ne prenait que  $3/4$  de litre d'eau. Son poids se réduisit de 60 à 47 kilogrammes, sa capacité vitale de 3<sup>l</sup>,75 à 2<sup>l</sup>,40, ses organes, son tour de poitrine diminuèrent très fortement; mais les *qualités psychiques* ne subirent aucune atteinte.

Ce problème de l'inanition totale, heureusement très rare, est moins intéressant, toutefois, que celui de l'alimentation insuffisante, ou de la *sous-alimentation*. Benedict et ses collaborateurs en ont également approfondi les effets sur le *metabolisme basal* (§ 85 et 111) des hommes, et Tigerstedt sur les femmes finlandaises.

Sur 12 étudiants dont le besoin en calories était de 3.100 par vingt-quatre heures, ils affaiblirent la ration jusqu'à faire tomber de 12 0/0 le poids du corps.

La ration d'entretien ne fut plus, dans ces conditions, que de 1.950 Calories, soient les  $2/3$ .

Il en résulte aussi une *perte d'azote* notable, ce qui implique « une activité cellulaire moindre ». Les urines en contenaient 40 gr. 50 par jour, au lieu de 14 grammes chez des sujets témoins.

Le fait ne doit pas nous surprendre, car le taux azoté ne subit pas une réduction du *tiers*, parallèle à celle de la ration alimentaire; il a vis-à-vis des rations une certaine fixité comme on l'a vu plus haut (§ 104).

Abaissant le nombre de Calories à 1.400, on vit le métabolisme affecter, peu à peu, celui d'une vie ralentie; car les pulsations ne furent plus, au matin, que 30 à 32, et la pression sanguine subit une chute notable; les échanges respiratoires se ralentirent (1).

Ce régime fut étudié durant trois semaines, et, cependant, ni dans les réactions mentales, ni dans les réflexes, on ne vit de troubles dignes d'être notés. La force physique elle-même n'en parut aucunement atteinte.

(1) F. G. Benedict, *A study of prolonged Fasting*: Public. 203; Washington, 1915. — Hana Olin et Carl Tigerstedt (*Öfversigt of Finska Vetenskaps-Societatens Förhandlingar*, 1918-19; tome I.XI), surtout chez les femmes pauvres, mal alimentées depuis longtemps.

Lambling avait constaté, à Lille, que chaque habitant ne consommait pas plus de 1.467 Calories, où le taux protéique n'excédait pas 40 grammes.

C'est la prolongation de cet état qui nuit finalement à la santé. Alors les forces générales diminuent progressivement. La contraction des muscles se ralentit; ils sont fatigués sans avoir travaillé (1).

À l'état d'inanition, ce sont surtout les muscles qui souffrent et perdent de leur puissance. Les facultés intellectuelles résistent, car la substance nerveuse est la moins éprouvée. Ainsi des déterminations faites sur le pigeon, le chat, le chien, ont donné un *pourcentage* d'utilisation très significatif, à la suite d'une longue inanition :

|                                     |        |               |                    |
|-------------------------------------|--------|---------------|--------------------|
| Graisses.....                       | 93 0/0 | à             | 97 0/0             |
| Squelette.....                      | 21     |               | 19 0/0             |
| Muscles.....                        | 42     |               | 70                 |
| Cœur.....                           | 45     |               | 55                 |
| Rate.....                           | 71     |               | 75                 |
| Pancréas.....                       | 64     |               | 39                 |
| Poumons.....                        | 22     |               | 30                 |
| Cerveau et moelle<br>épineière..... | 2      | (Chossat) (2) | 1,1 (Seldmair) (3) |

On voit clairement que les organes de la vie végétative sont plus éprouvés que ceux de la vie de relation.

Un sujet inanitié regagne *plus vite* son poids en absorbant des substances ternaires que des protéiques, pourvu que ces derniers soient dans la proportion de 2 grammes par kilogramme de poids. Exemple : après des jeûnes de *quarante heures* chaque fois, on (1) a fourni, à un homme de 54 kilogrammes qui produit 36.089<sup>k<sub>8</sub>m</sup> = 85 Calories sur bicyclette à frein en quatre heures, une ration de 2.600 Calories comprenant 1.750 Calories d'hydrates de carbone régulièrement. Les résultats furent les suivants :

(1) Gaglio (*Arch. p. les sc. méd.*, t. XVII, p. 301; 1884).

(2) Chossat (*Mém. Acad. Sc.*, t. VIII, p. 438; 1843).

(3) Seldmair (*Zeitsch., f. biol.*, t. XXXVII, p. 41; 1899).

(4) Jules Amar, *le Rendement*, p. 79-82; Paris, 1910.

|                |          |          |           |                                      |
|----------------|----------|----------|-----------|--------------------------------------|
| Protéiques...  | 93 Cal.  | 652 Cal. | 330 Cal.  | } moyennes<br>de<br>plusieurs jours. |
| Graisses.....  | 730 Cal. | 191 Cal. | 513 Ca    |                                      |
| Gain de poids. | 443 gr.  | 707 gr.  | 1.218 gr. |                                      |

La relation *optimum*, entre protéiques et graisses, est donc, en poids, de 100 à 70 grammes. Maignon a retrouvé depuis cette même proportion (1).

Les graisses assurent mieux la conservation du poids du corps que les protéiques, mais les hydrates de carbone l'emportent sur elles (2). Il faut préférer le *beurre*.

L'insuffisance d'aliments est plus sensible aux enfants qu'aux adultes, à cause de leur plus grande vitesse de croissance (§ 85 et 104) et de la puissance de leur déperdition calorifique.

**165. Influence des troubles physiologiques.** — Dans toutes les circonstances précédentes, les fonctions physiologiques (circulation, respiration, etc.) étaient supposées normales. Le sang remplit son rôle de véhicule de l'oxygène et de torrent purificateur des tissus. Aussi une compression qui gêne sa circulation (par le fait de vêtements trop serrés, ou d'attitudes professionnelles défectueuses) diminue-t-elle l'activité musculaire. L'*anémie* aggrave ce symptôme; il y a réellement fatigue (3); les fibres et cellules nerveuses sont moins excitables (4), sans doute par insuffisance d'oxygène.

Rien non plus ne doit troubler le jeu de la respiration qui assure cet apport constant d'oxygène. L'accumulation de gaz carbonique dans le sang, par suite d'expiration incomplète, comme il arrive parfois au cours du travail, détermine un affaiblissement musculaire d'origine toxique (5), et abaisse l'excitabilité nerveuse (6). Une intoxication, par la même

(1) Maignon (*Comptes Rendus*, 22 juillet 1918); — J. Amar (*ibid.*, 3 août 1918).

(2) Atwater et Benedict (*Bull.*, n° 136, p. 180; 1903), etc.

(3) A. Maggiora (*Arch. ital. Biologie*, t. XIII, p. 217); Jensen (*Pflügers Arch.*, t. LXXXVI, p. 47; 1901).

(4) Aducco (*Arch. ital. Biol.*, t. XIV, p. 136; 1890); Baglioni (*ibid.*, t. XLII, p. 83; 1904).

(5) Lothak de Lotha (*Comptes Rendus Acad. Sc.*, août 1902).

(6) G. Weiss (*Comptes Rendus Biol.*, 1900, p. 444; *Journal de Physiologie*, 1903, p. 239).

cause, produit l'*essoufflement* : il en est ainsi dans un travail trop rapide pour que tout le gaz carbonique ait eu le temps de s'éliminer (§ 149).

C'est un fait régulier que la fatigue accompagne le phénomène toxique qui a pour siège le sang. Par exemple, les poisons de l'urine, de la sueur, demandent à quitter l'organisme où il ne pourraient que troubler l'activité musculaire principalement (1) : la propreté de la peau, une quantité convenable de boisson réalisent cette élimination.

Si maintenant nous nous reportons à l'une des causes de la fatigue, à l'auto-intoxication (§ 154), nous reconnaitrons qu'un homme fatigué possède des muscles de moins en moins puissants qui se laissent distendre assez facilement (2). Et lorsque la fatigue est poussée à l'extrême, c'est alors le *surmenage* : des troubles graves, avec symptômes de paralysie momentanée, se manifestent (3) ; des fibres musculaires, des fibrilles nerveuses se trouvent lacérées intérieurement (4). On est « flambé », suivant l'expression consacrée en hippologie. Souvent la *contracture* se montre, plus ou moins douloureuse, et pour quelque temps. Le surmenage peut être mortel. On cite toujours, non sans raison, l'exemple du soldat de Marathon — symbolisé par l'admirable statue du Jardin des Tuileries, due au sculpteur Cortot — et qui, pour avoir fait une course surhumaine afin d'annoncer à ses concitoyens la victoire de Miltiade (en 490 av. J.-C.), tomba raide mort aussitôt après qu'il eut accompli sa mission.

Avant d'atteindre à l'extrême limite du surmenage, le travail fatigant occasionne une *fièvre de courbature*, également d'origine toxique (5). D'ailleurs, le travail intense élève un peu la température du corps, de 1° à 1°,50, tout au plus, et cela sans inconvénient aucun (marche de 100 kilomètres).

L'*âge* n'apporte à l'organisme, entre vingt et cinquante ans, que des modifications insignifiantes ; la force humaine progresse jusqu'à la quarantaine, mais ne se signale pas par

(1) Aducco (*Arch. ital. Biol.*, 1881, X, 1) ; — Casciani (*Rif. med.* juin 1896).

(2) Benedicenti, *loc. cit.*

(3) Trèves (*Arch. ital. Biol.*, t. XXX, p. 1 ; 1898).

(4) Th. Hough (*Amer. Journ. of Physiol.*, t. VII, p. 76 ; 1902).

(5) Mosso (*Arch. ital. Biol.*, 1880, t. VIII, p. 165).

des troubles physiologiques. Comme on l'a déjà vu (§ 149), les rythmes des respirations et des pulsations sont seuls modifiés. Il existe aussi des différences d'un *sexe* à l'autre; en particulier ces rythmes sont légèrement plus rapides chez la femme, le sang est un peu *moins riche* en globules rouges. Cet état physiologique présente des écarts accentués dans la période de la *grossesse*, et la puissance musculaire de la femme diminue (1). Toute fatigue doit alors lui être évitée, sous peine de la voir dépérir et mettre au monde des enfants débiles (2). Du reste l'anémie, chez les femmes, obéit souvent à des causes professionnelles, telles que l'intoxication par le plomb; ce peut être aussi la syphilis ou la tuberculose. Et la grossesse, avec la surcharge qui incline le tronc et détermine une pression qui gêne le mouvement du sang, avec l'excès d'oxygène qu'elle exige pour les opérations intra-utérines, interdit d'employer la femme aux travaux sévères de l'usine (3).

Il existe enfin des caractères *individuels*; ainsi les *sujets obèses* ont un sang moins riche en globules rouges; les *sujets musclés* l'ont, au contraire, très riche (Malassez) et se fatiguent moins vite.

Bien entendu, des conditions internes normales sont loin d'être offertes par tous les ouvriers sans exception; leur intempérance y apporte des troubles, ce qui prédispose au travail dans une mesure généralement faible. Il est utile de veiller à l'intégrité de leur santé, de faire ce qui est nécessaire pour la protéger, même malgré eux.

166. **Influence des sens.** — *Équation personnelle. Le Psychographe.* — Le rôle des sens est évident, notamment celui de la *vue*, de l'*ouïe*, du *toucher*. On sait qu'ils peuvent être éduqués et rendus plus utiles.

Une bonne vue contribue à la perfection de l'ouvrage, au « finissage ». Les ouvriers n'ont pas tous le même « coup

(1) Bouslacroix et Benoit (*Biol.*, 1903, p. 395).

(2) René Laufer (*Nouvelle Revue*, 1907, p. 11).

(3) Lire deux articles intéressants sur la grossesse et le travail professionnel, de Vicarelli (*Arch. ital. Biol.*, t. LXIII, sept. 1915), et Viale (*ibid.*, t. LXIV, janvier 1916).

d'œil ». Il faut éviter, spécialement, de faire travailler des *myopes* non corrigés, car ils se penchent pour mieux voir ce qu'ils font et se fatiguent en raison de cette attitude défec- tueuse. La vue permet un meilleur équilibre du corps.

Dans certains métiers, l'ouvrier doit savoir distinguer les *couleurs* (peintre, teinturier, décorateur de théâtres et d'ap- partements), et cela est affaire d'éducation bien souvent. Le *daltonisme* consiste à ne pas savoir distinguer entre eux : le rouge, le jaune et le vert. Environ 4 0/0 des hommes sont daltoniens ; les femmes le sont très rarement.

L'ouïe donne à l'ouvrier son allure normale comme elle donne la note au chanteur ; elle règle le mouvement des outils à action périodique (rabots, scies, limes, etc.). Les forgerons, terrassiers, frappent suivant un rythme qui accroit leur travail et empêche la rencontre de leurs instruments (marteaux). L'ouïe a un pouvoir d'analyse remarquable.

Enfin le *toucher* favorise le « tour de main », mélange d'agilité, d'habileté, de précision, qui dispense de la règle et du compas ; c'est le « coup d'œil » de l'aveugle.

Les qualités des sens sont appréciées au moyen d'un appa- reil que nous avons appelé *Psychographe*, parce que, en plus de la *vitesse* des réactions visuelle, auditive, tactile, il per- met de mesurer la durée d'un *acte mental* : discernement, attention, mémoire.

Le seul fait de distinguer, à cet égard, entre personnes lentes et rapides, aide à effectuer leur classement d'après leur *equation personnelle* (§ 86).

On donnera plus loin la description détaillée du Psycho- graphe (1) (§ 260).

En principe, un signal lumineux, sonore ou tactile inscrit lui-même, instantanément, son apparition par une petite encoche sur le papier d'un cylindre enregistreur. Aussitôt, le sujet examiné répond par la pression du doigt sur une petite capsule manométrique, laquelle est conjuguée avec un tambour inscripteur. D'où une seconde encoche.

Entre celle-ci et la précédente, il s'écoule un *temps* que

(1) A notre connaissance il n'existe pas un appareil d'ensemble plus maniable et plus exact.

l'on évalue d'après le tracé en 1/100 de secondes d'un électro-diapason (§ 206).

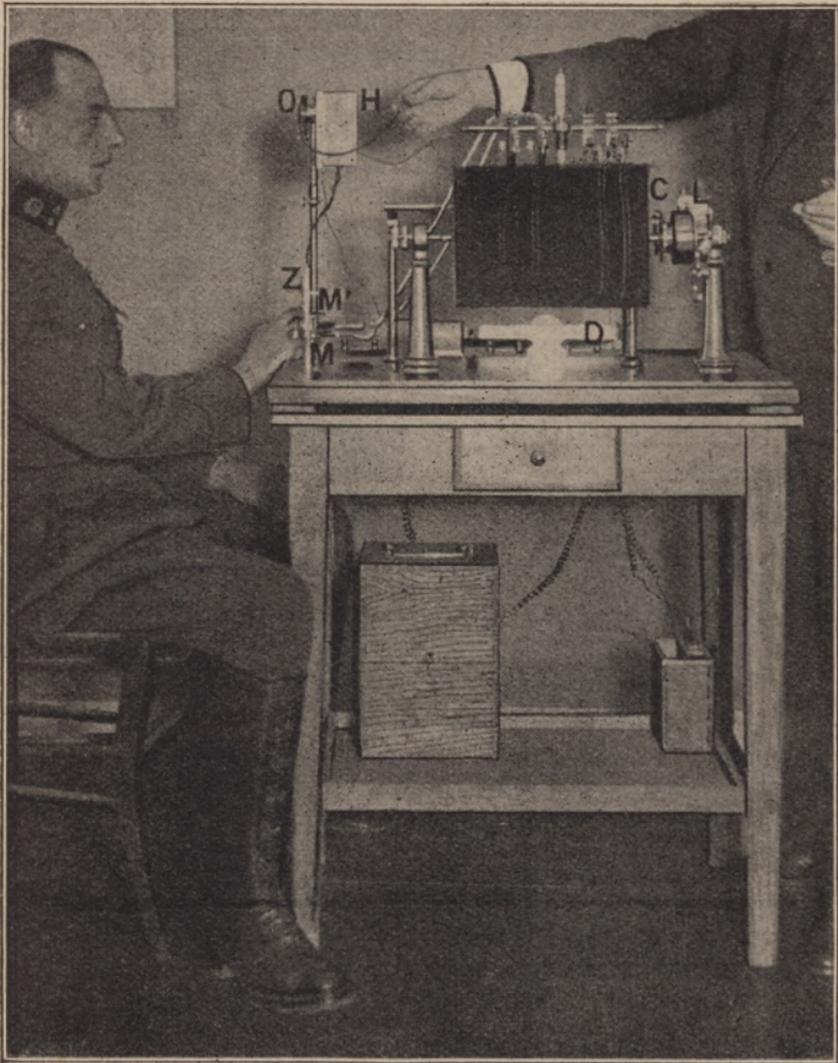


FIG. 146. — Usage du Psychographe Amar.

La figure 146 montre le Psychographe en fonctionnement. Par exemple, comme signal lumineux, c'est l'obturateur d'un dispositif photographique qui s'ouvre en découvrant

une petite lampe électrique, pendant qu'il met en circuit un signal inscripteur Déprez.

L'obturateur étant à diaphragme-iris, on peut réduire progressivement la surface lumineuse et mesurer l'*acuité visuelle*.

Il est également possible d'insinuer, entre cette partie et la lampe, des écrans *colores*, et d'opérer sur lumière rouge ou bleue.

Cela présente un autre intérêt. On dit, en effet, au sujet d'appuyer le doigt sur une capsule peinte en rouge, ou sur celle qui a la couleur bleue, suivant qu'il se découvre une lumière rouge ou bleue (M ou M'). Par là on oblige à faire attention, à choisir, à se rappeler la coloration perçue avant de réagir. Ce *retard* mesure les actes mentaux considérés. Il se déduit de la différence de durées entre la réaction ainsi *delibérée* et le réflexe visuel simple.

De nombreuses expériences, nous avons conclu aux résultats suivants (1), qui rectifient légèrement ceux donnés au § 86. Ce sont :

|                        |                       |
|------------------------|-----------------------|
| Réaction visuelle..... | 0",21 ± 0",02 (écart) |
| — auditive.....        | 0 ,16 ± 0 ,01         |
| — tactile.....         | 0 ,15 ± 0 ,01         |
| Discernement.....      | 0 ,14 ± 0 ,02.        |

Les valeurs qui dépassent celles-là de 10 0/0 sont normales, et traduisent un caractère ethnique. Quand elles atteignent 20 et 30 0/0, elles révèlent un état pathologique, une intoxication. Chez les *trépanés*, ce sont des retards de 70 à 120 0/0; on les observe parfois sur les *commotionnés*, mais sans persistance, ni surtout aggravation (2).

De nombreuses applications de ce genre d'évaluations, à la fois correctes et faciles, ont été données dans notre livre : *Organisation physiol. du travail (Supplément)*.

En général, il y a parallélisme des retards, soit pour les trois sens, soit pour chacun d'eux avec la réaction mentale.

(1) Jules Amar (*Comptes Rendus Acad. Sciences*, 3 et 24 juin 1918)

(2) Jules Amar, *Le psychographe et ses applications (Bull. Soc. Portug. Sc. Natur*, t. VIII, séance du 12 juillet 1918; Lisbonne).

Mais rien, manifestement, ne permet de noter une différence d'un sexe à l'autre. La figure 147 est un psychogramme visuel normal.

Le désordre des sens, sous une influence passagère (ivresse) ou permanente (alcoolisme, syphilis), se révèle dans ce genre de graphiques.

La *vision des couleurs*, qui est une affaire d'éducation et

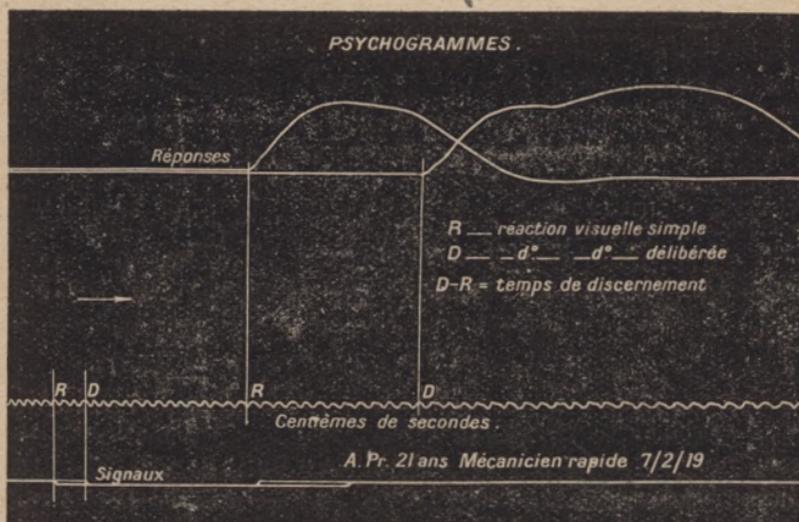


FIG. 147.

d'expérience, peut être précisée en faisant passer sous les yeux du sujet des écrans de nuances bien définies. La vitesse de ses réactions mesurera son degré d'éducation.

Quant au *daltonisme*, on a reconnu, sur un millier d'étudiants, qu'il a aussi des degrés, et que les vrais daltoniens ne forment pas un groupe homogène, une « race »; c'est le terme extrême d'une série de gens de moins en moins sensibles aux couleurs (1).

167. Influences favorables : massage, sommeil, repos. —

(1) Houston et Dunlop (*Philos. Magaz.*, 1921, t. XLI, p. 186).  
Voir aussi : Meissner (*Physik. Zeitsch.*, 1921, t. XXII, p. 268).

Parmi les influences susceptibles de favoriser la puissance musculaire, citons le massage et le sommeil.

Le *massage*, ou pétrissage des muscles, est réparateur. Ce fait, soupçonné par les anciens, mis à profit par les athlètes de tous les temps, est absolument vrai. Le massage délasse les muscles, rendus quelque peu rigides au cours du travail. « Il en augmente la résistance, conclut Maggiora de ses recherches ergographiques, et il en retarde la fatigue.

« Son effet est proportionnel à sa durée, entre certaines limites.

« Le pétrissage et le massage valent mieux que la percussion et le frottement.

« Le muscle, affaibli par le jeûne, est rendu résistant par le massage.

« Le muscle, affaibli par la marche, la veille, le travail intellectuel excessif, est restauré par le massage.

« Enfin, le massage, sans circulation du sang, ne fait rien (1). » Combiné à l'action d'un bain chaud, il rétablit dans son intégrité la puissance musculaire (2). Les Chinois ont la réputation d'être de très habiles masseurs.

L'influence du *sommeil* est non moins réparatrice que celle du massage. C'est que le sommeil n'est pas seulement le *repos*, tel qu'il se conçoit à l'état de veille ; mais il est le *repos complet*, réduisant la dépense d'énergie de  $\frac{13}{100}$  de sa valeur statique (§ 110), réduisant aussi la somme d'excitations nerveuses qui nous atteignent à l'état de veille, et supprimant toutes communications entre les appels de l'extérieur et l'ébranlement physiologique de l'intérieur. L'excès d'alimentation ne saurait remplacer le sommeil (3), vu que le repos des nerfs et des muscles est indispensable à leur restauration. Benedicenti s'est assuré, grâce au *myotonometre* (§ 72), que les muscles sont plus *retractiles* et résistent plus à la distension après un sommeil profond (4).

(1) A. Maggiora (*Arch. ital. biol.*, t. XVI, p. 245 ; 1891) ; Ruge (*Engelmann's Arch. f. Phys.*, 1901, p. 466).

(2) Trèves (*Arch. ital. biol.*, t. XXX, p. 14 ; 1898).

(3) A. Maggiora (*Arch. ital. Biol.*, t. XIII, p. 187).

(4) Benedicenti (*Arch. ital. Biol.*, 1896, t. XXV).

La *durée* du sommeil est un facteur important au rétablissement de l'équilibre des forces, rompu par le travail ; il faut *sept heures* au moins, et il les faut la nuit, à l'abri des trépidations, quand tout se tait autour de soi. Dans cette période, la dépense énergétique s'abaisse, comme on l'a déjà dit, et la température du corps diminue de 0°,80 entre vingt heures et vingt-quatre heures (§ 110).

Repos et sommeil sont les conséquences fatales de la loi du *rythme* qui semble gouverner la vie et constituer pour elle un moyen de défense (Sur le repos hebdomadaire, voir § 156).

**168. Influences morales.** — Il faut faire figurer parmi les facteurs internes de la puissance musculaire les phénomènes d'ordre moral, qui résultent de la vie que mène l'ouvrier dans sa famille ou parmi ses compagnons. S'il est satisfait, il ressent moins la fatigue, la réparation de ses tissus est plus rapide : « Les joyeux guarissent toujours », disait Ambroise Paré. S'il est égayé par des récits, des conférences, des spectacles, il s'adonnera avec ardeur à son travail, « lancé » par les impulsions de ces souvenirs agréables (voir aussi : milieu extérieur, § 200). S'il est tenté par un salaire élevé ou s'il a l'amour-propre du *bon travail*, il déploiera une grande vitesse, ce qui est économique par unité de travail produit. Par contre, il faut tenir compte des *soucis* de l'homme, de *son état de santé* ou de la maladie d'un membre de sa famille, de ses *préjugés* même, car sa religion peut lui interdire de travailler tel jour, ou de prendre tels aliments qu'on lui présente. S'il a des *ennuis*, la contractilité de ses muscles décroît. Lombard s'en est assuré de la manière suivante : un genou étant placé sur l'autre, tandis qu'un pied pose à terre, il percute le muscle extenseur de la jambe avec un marteau à pendule. A chaque coup, le pied se soulève, et un appareil enregistreur, placé au bout des doigts du pied, indique la force de la contraction. Quand le sujet a des ennuis, l'*ampleur de ses mouvements diminue* très nettement (1).

Chez la femme, toute entière dominée par sa *sensibilité*, l'*émotion* a des effets fâcheux ; elle ralentit son travail, trouble

(1) W.-C. Lombard (*Journ. of Physiol.*, t. XIII, p. 4 ; 1892).

l'exactitude de son activité mentale, et retentit même sur sa santé. On a observé qu'alors le lait est moins riche en lactose et corps gras, et nourrit peu l'enfant (1).

C'est aussi une influence morale puissante que l'amour de son métier ; un patron doit veiller à ce que l'ouvrier ne soit pas détourné d'une besogne qu'il aime, à laquelle il était habitué, pour être appliqué à une besogne qui ne lui convient pas par *tempérament*. En un mot il faut éviter d'aller contre les *vocations* ; et puisque l'amour de l'argent a déplacé notablement l'amour du métier, il est nécessaire de *déterminer* les vocations, de les rendre permanentes par l'*intérêt*.

**169. Influences professionnelles.** — Parmi les facteurs internes du travail, il faut mentionner l'entraînement de l'homme, dont il a été question plus haut (§ 145), son habileté, l'art du bon ouvrier. Ce sont des qualités propres à accroître son rendement, et qui ne s'acquièrent que par l'habitude et la réflexion. L'ouvrier qui n'apporte aucune attention à son travail l'accomplira sans profit pour son éducation professionnelle ; il ne progressera pas ; il sera véritablement une « machine » ; il ne surveillera pas les attitudes défectueuses qui le fatiguent ; il n'évitera pas de laisser coopérer à une action dynamique des muscles qui n'ont rien à y faire, comme le balancement, l'inclinaison du corps, etc. ; il ne prendra pas exemple sur le bon, l'adroit ouvrier qui, tout près de lui, abat sa besogne en économisant ses forces et produit plus de travail.

Aussi l'industriel, notamment les ingénieurs américains, distinguent-ils très nettement l'*ouvrier de première classe*, qui étudie et rectifie les défauts de ses mouvements, de l'*ouvrier de deuxième classe*, à qui cette pénétration manque entièrement (2).

Cette distinction est nécessaire, car seuls les hommes de la première catégorie sont capables d'augmenter leur travail d'une manière sérieuse et méritent d'être bien payés.

(1) Voir, dans *Organisation physiologique*, tout ce qui concerne le travail féminin et le *Féminisme*.

(2) Gilbreth, *Motion study*, London, 1911. Traduit en français par J. Ottenheimer ; Paris, 1919 (Dunod, edit.).

On verra plus loin (*travail du limeur*) comment on peut déterminer les *aptitudes professionnelles*.

**170. Influences morphologiques et dynamiques.** — Une classification des types d'hommes peut encore avoir pour base le développement, l'architecture du corps, en tant qu'elle favorise l'aptitude à un genre particulier d'activité, soit le *travail de force*, soit le travail de *vitesse*. Sur cette base une science nouvelle se constitue qui traite des rapports possibles entre les formes plastiques et fonctionnelles du corps humain : c'est la *morphologie dynamique*. Elle établit non pas les différences de *tempéraments*, chose très vague en soi, mais la prédominance de telle ou telle fonction physiologique : l'un est du « type digestif », mangeant beaucoup, travaillant lentement, mais longuement ; l'autre est « musculaire », c'est-à-dire très en train à mettre en œuvre une puissance considérable, dont la durée n'est jamais bien grande ; un troisième appartient au « type respiratoire » qui offre l'avantage d'entretenir longtemps un effort relativement élevé ; enfin, il existe certainement un type « nerveux » ou *cérébral*, qui, par la vitesse des *mises en train*, des démarrages de ses muscles, travaille avec économie, est puissant grâce à sa vitesse, et résiste, du fait même de sa complexion, aux élancements de la fatigue.

Il n'est pas douteux qu'à chacun de ces quatre types d'hommes soit appropriée une forme d'activité déterminée, beaucoup plus que toute autre. Tout le monde a observé les débardeurs, terrassiers, qui assument des travaux pénibles, les exécutent sans hâte, généralement, mais aussi presque sans répit ; à cette classe d'hommes l'alimentation doit être offerte en abondance ; ils la digèrent assez facilement quelle qu'en soit la qualité. Les Américains (Taylor) empruntent, pour les distinguer, le vocabulaire des zootechniciens, et en font « le type du bœuf ». L'aspect est robuste, membres moyens ou courts, mais épais, forts, à articulations solides et massives ; la poitrine est large, les jambes sont écartées, formant une bonne base d'appui. Cependant ce type « digestif » n'est pas très musclé ; si, au contraire, sa musculature se développe, il passe au type musculaire, lequel

gagne en *puissance* moins cependant qu'il ne perd en continuité d'action. C'est ainsi que les lutteurs aux muscles saillants sont de mauvais travailleurs.

Le « digestif » peut encore avoir des membres longs qui lui permettent des mouvements de grande amplitude. Les courriers d'Orient, les « rekkas », parcourent, sans se reposer, de très grandes distances d'un pas rapide et allongé.

Pour transporter constamment de petits fardeaux, de tels hommes sont d'un rendement élevé.

Le type *respiratoire* se rapproche plus du « nerveux » que des précédents; il peut soutenir un travail d'une certaine durée en développant une grande puissance; mais il est impropre aux exercices de force. Le type *nerveux* ou *cérébral* soutiendrait, cependant, un effort considérable, pourvu qu'il dure peu; cet épuisement rapide provient de la double dépense musculaire et nerveuse, de cette dernière plus spécialement; la résistance des organes du mouvement n'est pas grande chez lui. Autant le digestif répugne aux « coups de collier », autant le nerveux s'en fait une loi.

Si, d'autre part, on considère les *qualités psychiques* des individus, on se trouve obligé de répartir ceux-ci suivant leur degré d'intelligence et leur équation personnelle, et de distinguer ceux qui satisfont au travail rapide de ceux qui travaillent lentement. L'industrie impose ce choix, car *selectionner* c'est approprier chacun à la besogne la plus propre à faire valoir toutes ses capacités, pour qu'il augmente sa puissance productive. Le corollaire de ce meilleur rendement doit être, nécessairement, une élévation des *salaires*.

Les diverses classes d'hommes que nous venons de distinguer trouvent leur emploi dans les professions agricoles, industrielles, militaires, sportives; cet emploi exige, par conséquent, un examen des plus attentifs en vue d'une répartition judicieuse du travail : *the right man in the right place*.

**171. Influences sociales.** — On peut admettre, parmi les facteurs internes de l'activité humaine, ceux qui dérivent de l'*hygiène sociale*, et qui sont doubles : 1° l'hygiène du corps, alimentation rationnelle, prophylaxie, bien-être de l'homme au point de vue physiologique; 2° l'hygiène et le développement de l'esprit, ou mieux, les qualités morales du tra-

vailleur, lesquelles sont une résultante de son bien-être général et de son milieu. L'action du milieu social est certaine; l'homme la subit; ce que font les autres, bien ou mal, il acquiert une tendance à le faire (1). La vie urbaine et le milieu cosmique auraient, d'après A. Marie et Mac-Auliffe (2), fait du *Parisien* un type *cerebral*, moins développé physiquement et moins pigmenté que partout ailleurs en France. Comme de plus en plus, la solidarité devient la loi des organisations ouvrières, les *syndicats* imposent à tous leurs adhérents l'acceptation d'une tactique longuement étudiée où le patronat s'obstine à voir un véritable danger pour ses intérêts propres. Nous sommes convaincu, tout au contraire, que ces intérêts s'accordent avec ceux des employés. La science de l'énergie évalue exactement les sacrifices journaliers des travailleurs; la technique professionnelle enseigne les méthodes pour accroître le rendement humain. L'une et l'autre démontrent la possibilité d'abaisser le prix de revient de l'unité de travail, et conséquemment d'élever, dans une certaine mesure, les salaires, ou encore de réduire judicieusement la journée active. Telle est la résultante du progrès scientifique dans ces dernières années (voir livre VI, chap. IV). Il serait vain de le nier, et de ne pas vouloir, par des conditions meilleures assurées aux ouvriers, contribuer à l'œuvre nécessaire d'hygiène sociale, œuvre de prospérité commune, et en même temps de justice et de concorde.

Les précédentes données, sur les aptitudes physiques, psychiques et professionnelles, offrent un intérêt pratique dont on a parlé ailleurs (3). C'est qu'elles permettent de préciser les conditions d'emploi de chacun, le rendement à en attendre, les précautions et mesures qui pourront favoriser ce dernier, en un mot elles sont les facteurs indispensables de l'*organisation* de notre activité. Qu'il s'agisse des métiers, de l'apprentissage, du choix d'une carrière pour les jeunes gens, ou encore de la *Culture physique* et des sports, elles en fournissent des bases indiscutables. Nous avons trouvé commode de les

(1) Pilker, *Die Grundgesetze des Neuro-psychischen Lebens*, Berlin, 1900.

(2) *C. R. Acad. Sc.*, 1920, t. CLXXI, p. 527.

(3) *Organisation physiologique* (Supplément).

réunir dans des *Fiches d'aptitudes* individuelles. La figure 148 est une fiche d'usine, établie pour un ouvrier (ou un apprenti).

SERVICE PHYSIOLOGIQUE (USINE OU) ÉCOLE DE : *Versailles*  
 DU TRAVAIL  
 Adresse : *Versailles* Ville de *Versailles*  
 Telephone : Le *4 Mars* 1920  
 Inter. *L. 40* FICHE D'APTITUDE N° *65*

| ETAT CIVIL                               | APTITUDES PHYSIQUES   | APTITUDES PSYCHO-PHYSIOL   | APTITUDES PROFESSIONNELLES  |
|--|---|--|---|
| Nom : <i>Durand</i>                      | Poids : (P) :<br><i>59 kg. 250</i>  | Instruction générale :<br><i>Certificat d'études primaires</i>       | Instruction technique :<br><i>comme à manipuler</i>   |
| Prenoms : <i>Jean Marie Pierre</i>       | Taille :<br><i>Debout (T) 150<br/>Assis (A) 79<sup>cm</sup>. 80</i>                                 | Etat des sens :<br><i>Bonne acuité visuelle, auditive et tactile</i> | Qualités manœuvrières :<br><i>Adroit de ses mains</i>   |
| Age : <i>14 ans et 7 mois</i>            | Coefficient thoracique :<br><i>A/T = 0. 532<br/>Bon</i>   | Equation personnelle :<br><i>Un peu lente</i>                        | Dispositions à observer :<br><i>Surveiller l'ordre de ses occupations</i>                           |
| Situation militaire :<br><i>Néant</i>    | Coefficient morphologique :<br><i>P/T = 395 gr</i>  | Attention :<br><i>Normale</i>  | Rendement journalier :<br><i>Fait tous ses devoirs</i>  |
| Originaire :<br><i>de Paris</i>          | Endurance :<br><i>Bonne</i>   | Vocation :<br><i>Médecine (comme le père)</i>                        | Observations générales :<br><i>Excellent élève qu'il faut pousser dans la carrière de chimiste.</i> |
| Adresse : <i>Rue des Fèvres</i>          | Entraînement :<br><i>Moyen</i>  | Goûts :<br><i>Ingénieur<br/>Chimiste</i>                             | Signe,<br>le Directeur<br><i>X</i>  |
| Profession antérieure :<br><i>Aucune</i> | Etat physiologique :<br><i>Indice respiratoire excellent.<br/>5. 70<br/>Cœur et poumons normaux</i> | Caractère :<br><i>Doux et très correct</i>                           |   |
| Dernier patron :<br><i>parents</i>       |   |  |   |
| Personnes à sa charge :<br><i>Néant</i>  |   |  |   |

Fig. 148

## CHAPITRE II

### LE MILIEU EXTÉRIEUR.

172. **L'atmosphère.** — La vie humaine se développe dans le milieu atmosphérique, qui s'étend jusqu'à l'altitude de 150 à 160 kilomètres. Au niveau du sol que nous habitons, la composition de l'air, abstraction faite des gaz rares et des impuretés, est :

Azote (1) : 79 0/0      Oxygène : 21 0/0 (en volumes).

Le gaz carbonique y est en traces : 0,03 0/0 environ. La vapeur d'eau y occupe une *masse* différente suivant les circonstances et se traduit par l'état *hygrométrique* du milieu (voir plus loin, § 181). Enfin, des microbes, des particules solides, des *grains électriques* (2) invisibles, de l'*émanation radio-active*, sont disséminés dans l'atmosphère, normalement. Mais accidentellement, elle peut être viciée par des gaz plus ou moins toxiques ou délétères (sulfureux, chlorés, oxycarbonés, etc.).

La pureté de l'air augmente avec l'*altitude*; l'effet perturbateur, à ce point de vue, du voisinage du sol, se fait encore sentir à 3 kilomètres, au témoignage des *ballons-sonde*. Les nuages prennent naissance au-dessous de ce niveau et se rencontrent jusqu'à 10 kilomètres(3) de moins en moins épais.

La température de l'air varie dans les vingt-quatre heures; le maximum se produit vers les deux heures de l'après-midi, et le minimum un peu après le lever du soleil, à huit heures du matin en janvier, à quatre heures du matin en

(1) Y compris 0,94 0/0 d'*argon*, d'après A. Leduc.

(2) Le terme est de M. Langevin. On dit, plus souvent, des « ions ».

(3) Voir l'intéressante monographie de Wegener (*Fortschritte der naturwissenschaft forschung der Abderhalden*, t. III; 1911).

juillet; il en résulte une amplitude d'oscillations égale à 3°,6 en janvier et 9°,3 en juillet.

La température de l'air se modifie, ainsi que nous le verrons, en fonction de l'*altitude* et de la *latitude*.

Enfin, on désigne du nom de *pression atmosphérique*, le poids d'air que la surface d'un corps (celle d'un homme par exemple) supporte à l'altitude où il se trouve. Cette pression, au niveau de la mer, est égale à celle de la colonne barométrique : 76 *centimètres* de mercure. Sur 1 centimètre carré de section, et la densité du mercure étant 13,6, c'est un poids de :

$$76 \times 13,6 = 1.033 \text{ grammes.}$$

La surface du corps d'un adulte étant 1<sup>m</sup>99 (§ 82), c'est une pression totale de :

$$19.900 \times 1^{kg},033 = 20.556 \text{ kilogrammes environ,}$$

pression énorme, mais, cependant, *inefficace*, car elle s'exerce à l'intérieur comme à l'extérieur de l'organisme : ces deux actions s'équilibrent sur des tissus, liquides et solides, à peu près incompressibles.

En résumé, les *facteurs d'action du milieu externe* sont : la *température*, de beaucoup le plus important; l'*état hygrométrique*; la *pression atmosphérique*; les *radiations*; les *champs électrique, magnétique, sonore*; les *vapeurs et gaz délétères*.

Nous étudierons brièvement ces facteurs dans la mesure où ils modifient les conditions du travail professionnel, et nous y ajouterons l'influence des *conditions mécaniques* (outils, attitudes), dans lesquelles s'effectue ce travail.

**173. Influence de la température.** — A raison de son action, la plus puissante et la plus étendue de beaucoup, nous avons séparé l'étude de la *radiation calorifique* de celle des radiations qui seront étudiées plus loin. La température modifie la dépense énergétique des êtres vivants; chez les animaux, elle se fait sentir sur les propriétés des muscles et des nerfs.

Il résulte des recherches concordantes de divers auteurs que la dépense de l'organisme augmente au fur et à mesure que diminue la température extérieure. Le *froid* stimule les

combustions vitales, tandis que la chaleur les ralentit. Cet effet du froid s'exerce, selon toute apparence, sous la forme du *frisson* (1), car, en abaissant *lentement* la température d'un bain, de manière à éviter le frisson, on ne constate pas d'accroissement marqué de la production calorifique (2).

Le moyen, ainsi indiqué dans le frisson, n'exclut pas une cause générale : celle du *refroidissement des corps* par *rayonnement*. Plus la température extérieure est basse, plus la surface cutanée de l'animal rayonne et tend à perdre de la chaleur. La *vitesse de refroidissement* des corps chauds augmente proportionnellement à l'excès de leur température propre sur celle du milieu extérieur. C'est ce qu'on appelle la *loi de Newton*. Si nous comparons le corps humain à une enceinte d'eau chaude, le rayonnement est mesuré par le nombre de petites calories émises par une surface de 1 centimètre carré. Comme l'*émission*, d'après la loi de Newton, est proportionnelle à la différence de température de la surface et du milieu extérieur, on adopte pour le *pouvoir émissif*  $K_1$  le nombre de calories par seconde et par différence de 1 degré (fig. 149).

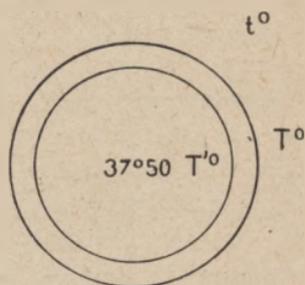


FIG. 149. — Coupe schématique du corps humain :  $T'$  et  $T$  sont les températures interne et externe de la peau ;  $t$  est celle de l'air ambiant.

Ainsi, pour l'excès de température ( $T - t$ ), la déperdition par seconde et par centimètre carré de surface rayonnante sera :

$$q_1 = K_1 (T - t) \text{ petites calories.}$$

Le rayonnement tend à diminuer la température du corps, lequel s'efforce de la maintenir *constante* (vers  $37^{\circ},50$ ) en produisant plus de chaleur (régulation chimique).

La valeur du pouvoir émissif  $K_1$  varie suivant la *nature* et la *couleur* de la surface rayonnante.

(1) Ch. Richet. *Trav. de Laboratoire*, t. III, 1895.

(2) J.-E. Johanssohn (*Skand. Arch. f. Physiol.*, t. VII, p. 123, 1897) ; — Sjöström (*ibid.*, t. XXX, p. 1 : 1913).

En outre du rayonnement, l'air qui se renouvelle à la surface du corps et prend contact avec lui emporte, par *convection*, une quantité de chaleur. La perte due à cette convection de l'air dépend de l'écart de température ( $T - t$ ) et de la grandeur de la surface, mais aussi de la forme de celle-ci. D'après les recherches classiques de Péclet, on peut adopter pour la forme du corps humain un coefficient  $K_2 = 0^{\circ},000066$  par centimètre carré et par seconde; d'où :

$$q_2 = K_2 (T - t)$$

en petites calories

La perte calorifique *par centimètre carré et par seconde* atteint donc ensemble :

$$q_1 + q_2 = (K_1 + K_2) (T - t).$$

Remarquons que la température  $T$  à la surface *externe* de la peau n'est pas facile à mesurer, ni constante. Il est nécessaire de s'en passer. Voici comment. La température profonde de l'organisme,  $37^{\circ},50$  environ, se maintient grâce à un flux de chaleur permanent, à un *régime calorifique*. Le caractère de l'état de régime est que la peau reçoive sur sa *face interne* autant de chaleur qu'elle en perd à sa surface externe. On établira, sans difficulté, qu'elle reçoit :

$$q_3 = (K_1 + K_2) (37^{\circ},50 - T'),$$

$T'$  étant la température cutanée intérieure (voir figure précédente). D'où :

$$q_3 = q_1 + q_2.$$

Mais la *transmission de la chaleur* a lieu à travers une épaisseur  $e$  de la peau dont la *conductibilité* est à déterminer. On nomme *coefficient de conductibilité*  $c$  le nombre de petites calories pouvant traverser en 1 seconde une surface de 1 centimètre carré sous une épaisseur de 1 centimètre, et pour une différence de température égale à  $1^{\circ}$  entre les deux parois interne et externe. Dans ces conditions, la chaleur transmise est :

$$q_4 = c \frac{(T' - T)}{e}$$

en petites calories, et l'on a nécessairement :

$$q_4 = q_3 = q_1 + q_2 = q \text{ (en général).}$$

L'avantage d'avoir ainsi trois expressions de la même perte calorifique est qu'elles permettent d'éliminer  $T$  et  $T'$  que nous ne connaissons pas, pour ne résoudre le problème qu'au moyen des températures connues :  $37^{\circ},50$  pour l'intérieur,  $t^{\circ}$  pour l'extérieur (l'air).

Des opérations très simples donneront, en effet :

$$q = \frac{cK_2(K_1 + K_2)(37^{\circ},50 - t)}{c(K_1 + 2K_2) + eK_2(K_1 + K_2)}$$

En ce qui concerne la peau humaine, on peut admettre une épaisseur  $e = 0^{\text{cm}},2$ , en moyenne. Les coefficients sont :  $c^{(1)} = 0^{\circ},00060$ ;  $K_1 = 0^{\circ},00015$ ;  $K_2 = 0^{\circ},000066$ . Cela donne :

$$q = 497 \times 10^{-7} \times (37^{\circ},50 - t^{\circ}).$$

Par vingt-quatre heures ou en  $(3.600 \times 24)$  secondes, un centimètre carré de peau perdra une quantité de chaleur :

$$Q_1 = 0^{\text{Cal}},004294 (37^{\circ},50 - t^{\circ}) \text{ en grandes calories.}$$

Comme la surface d'un adulte est 19.900 centimètres carrés environ, la perte sera :

$$Q = 85^{\text{Cal}},450 (37^{\circ},50 - t^{\circ}),$$

dans un milieu extérieur à  $t^{\circ}$ . C'est une formule à retenir.

**174. Applications.** — Soit un milieu à  $9^{\circ}$ . Remplaçant  $t^{\circ}$  par  $9^{\circ}$  dans l'expression de  $Q$ , nous aurons :

$$Q = 2435 \text{ Calories.}$$

A cette même température, Jules Lefèvre <sup>(2)</sup> mesura un total de 3.216 Calories. D'où l'on peut conclure à une dé-

(1) Jules Lefèvre évalue  $c$  à  $0^{\circ},00060$ ; Adamkiewicz avait trouvé, pour les muscles :  $0^{\circ},00012$ , valeur certainement trop faible, et des expériences de Bordier on déduirait aussi  $0^{\circ},00014$ .

(2) *Bioénergétique*, p. 405.

pense *physiologique* de 781 Calories, indépendante des influences thermiques de l'extérieur.

Faisons  $t = 20^\circ$  (cas des expériences américaines). Alors :  
 $Q = 1.496$  Calories, ce qui conduit à :

$$1.496 + 781 = 2.277 \text{ Calories.}$$

comme dépense statique totale, dont  $2/3$  environ servent à la régulation.

Dans un milieu chaud (aux tropiques), à  $37^\circ,50$ , on aurait :

$$37^\circ,50 - 37^\circ,50 = 0;$$

la déperdition serait nulle et l'organisme réduit à sa dépense d'*énergie minimum*. Allons encore plus loin et supposons une température  $t$  supérieure à  $37^\circ,50$ . L'organisme n'en profitera pas, car, en dehors de sa régulation thermique, il ne saurait employer la chaleur à aucun service proprement physiologique. Tout au contraire, elle sera embarrassante et même dangereuse pour lui, au point qu'il luttera pour s'en défaire et produira une *transpiration exagérée*, capable de lui procurer un refroidissement convenable (c'est la régulation physique de Rubner, § 115).

Les applications individuelles sont très intéressantes : dans le cas des enfants, vu que leur surface est relativement trop grande, la déperdition calorifique est relativement plus élevée que chez l'adulte. Les personnes *peu corpulentes* ont, pour la même raison que précédemment, une déperdition excessive, à laquelle ils répondent par une production calorifique intense. Les hommes *obèses* ont, au contraire, une faible surface relative. Malgré cela, l'intensité de leurs combustions ne suffit pas à couvrir la dépense nécessaire. Et il en est ainsi des sujets émaciés, peu musclés.

**175. Autres effets de la température.** — On a reconnu que la contraction des muscles devient rapide, énergique au voisinage de  $+ 20^\circ$ , et qu'à cette même température la résistance à la fatigue est maximum (1). De plus l'accroissement, la ré-

(1) J. Carvallo (*Comptes Rendus Acad. sciences*, t. CXXX, 1900).

novation cellulaire sont accélérés entre  $+ 37^{\circ}$  et  $+ 40^{\circ}$ . Des effets nettement opposés à ceux-ci s'observent à basse température (1).

L'excitabilité des nerfs augmente depuis  $0^{\circ}$  jusqu'à  $40^{\circ}$ , en sorte que l'élévation thermique se fait sentir plus particulièrement sur les propriétés nerveuses (2), ou, si l'on veut, sur les mouvements de l'homme. L'*optimum* pour les ateliers est à  $15^{\circ},50$ .

Une journée très chaude, à Paris par exemple, se marque par le même désordre chez les personnes que dans une ville du midi. Il en fut ainsi en juillet et août 1911.

176. Sur la respiration, la température agit pour la retarder ou l'accélérer suivant qu'il fait chaud ou froid. Les échanges gazeux qui augmentent ainsi avec l'abaissement de la température (3) s'expliquent par l'intensité croissante des combustions.

Mais une chaleur intense accroît le *rythme* des respirations et donne lieu à une véritable *polypnée* (Richet). Elle s'observe sur les chiens quand ils halètent au soleil. Elle a pour conséquence une transpiration d'eau abondante : c'est donc un mécanisme de défense désespérée (4).

Les échanges gazeux, dans certaines limites de température, sont plus faciles quand le milieu extérieur est froid : l'air froid traverse fortement la membrane pulmonaire, par une sorte de *thermo-endosmose* vers un milieu chaud (5). En outre il contient plus d'oxygène que le même volume d'air chaud : ce qui est une bonne condition pour la dépense économique de l'organisme. La respiration dans une atmosphère surchauffée est donc peu favorable au travail physiologique. On pourrait rapprocher de ce fait celui des mo-

(1) R. Penzo (*Arch. p. le sc. med.*, t. XVI, p. 129 ; 1892) ; Bizzozero et Sacerdotti (*Giornale della R. Accad. d. med. di Torino*, t. LIX, n° 5 ; 1896).

(2) G. Weiss (*Journal de Physiol.*, 1903, p. 31).

(3) Vernon (*Journal of Physiol.*, 1897, 443).

(4) Ch. Richet (*Dictionnaire de Richet*, art. *Chaleur*, t. III, p. 175) ; Langlois et Garrelon (*Journ. de Physiol.*, 1906, p. 236 ; 1907, p. 640).

(5) G. Lippmann (*Comptes Rendus Acad. Sciences*, t. CXLV, p. 104 ; 1907) ; Aubert, Thèse Sciences ; Paris, 1912.

teurs à combustion, qui ont un rendement faible quand ils sont exposés à une brusque élévation de température : c'est que, par cylindrée, l'air chaud introduit moins d'oxygène que l'air froid.

En témoignage de l'ensemble des inconvénients qui viennent d'être exposés, citons cette observation de Coulomb <sup>(1)</sup> sur des soldats de France ayant travaillé à la Martinique : « J'ai fait exécuter par les troupes de grands travaux à la Martinique ; le thermomètre y est rarement *au-dessous de 20°*. J'ai fait exécuter en France les mêmes genres de travaux par les troupes, et je puis assurer que sous ce 14° degré de latitude, où les hommes sont presque toujours inondés de leur transpiration, ils ne sont pas capables de la *moitié* de la quantité de travail journalier qu'ils peuvent fournir dans nos climats <sup>(2)</sup>. »

177. *Climats.* — Quand la température dépasse certaines limites, l'organisme souffre et peut même se trouver en danger. Tout d'abord il luttera, par une production calorifique intense, pour que le *froid* n'abaisse pas sa température centrale ; il se défendra, de même, contre la *chaleur* excessive, par une transpiration abondante.

Il est rare que, dans les pays habités, les extrêmes de la température moyenne du mois excèdent + 36° et — 22°. L'oscillation est tout au plus de 60°. Encore est-il qu'en Europe et en Afrique le froid le plus rigoureux atteint — 14°, la chaleur la plus intense + 36°. De telles températures ne troublent pas les fonctions physiologiques, mais elles modifient sensiblement la dépense d'énergie et dépriment un peu le travail. En particulier, la température basse porte cette dépense d'énergie, ou la ration d'entretien, à une valeur très élevée ; la température haute limite la production de travail, et réduit le métabolisme basal, du moins chez les habitants des tropiques (Oz. Almeida, *loc. cit.*).

(1) Coulomb (mémoire cite, fin), 1785 (date de sa rédaction).

(2) La température moyenne vraie de la Martinique est 25°,60, soit un maximum de 27° et un minimum de 24°. Il convient d'ajouter que les indigènes des pays chauds souffrent moins de la température élevée que les étrangers ; nous verrons plus loin pourquoi (22 179 et 196).

Le rôle du *climat* est défini par ce que nous venons de dire, sans compter les autres facteurs qui le caractérisent et sur lesquels nous reviendrons : état hygrométrique, altitude et latitude. Les climats *polaires*, où le froid atteint — 50° et même parfois — 80°, ont un effet curieux sur les échanges nutritifs. Alors que l'organisme doit s'alimenter beaucoup et respirer abondamment, l'action de la température polaire ralentit le rythme respiratoire et gêne un peu l'expiration des gaz (Nansen, Amundsen, etc.). Malgré cela, sous la protection des fourrures, l'homme arrive à garder une température centrale constante.

Lorsque, dans des conditions de protection insuffisantes ou de résistance organique défectueuses (alcoolisme), l'organisme se refroidit intérieurement, la vie est menacée. Vers 32°, soit un abaissement de 5°,50, la mort est à peu près certaine. De même, si, de 37°,50, la température centrale s'élève à 43°-44°, il y a danger de mort. Les empoisonnements conduisent très souvent à une *hypothermie*.

De toutes façons, dans des conditions strictement physiologiques, sur un sujet normal, et pour les valeurs habituelles de la température, l'action de celle-ci retentit surtout sur les échanges nutritifs, et elle se complique ou se corrige par le rôle des *vêtements*, l'*humidité* de l'air et la *vitesse des courants* atmosphériques; ce dernier facteur est relatif à la convection et à la pression qui s'exerce sur les muscles.

On a constaté, enfin, que les *décès par affections respiratoires* sont d'autant plus nombreux que la température est plus basse, et que les vents NNE à E sont plus fréquents (1).

**178. Influence des vêtements.** — La peau humaine protège fort mal la température centrale; les cheveux et les poils ont une action tout à fait intime. Aussi l'homme se défend-il artificiellement par le moyen de *vêtements*. Il est évident que le pouvoir protecteur de ces derniers dépend de la nature et de l'épaisseur de l'étoffe, c'est-à-dire de sa *conductibilité*. Nous savons que le pouvoir conducteur de la *peau* humaine est de 0,0006, c'est-à-dire qu'elle laisse passer par seconde et par centimètre carré  $\frac{6}{10.000}$  de petite calorie,

(1) L. Besson (*Comptes Rendus Acad. Sc.*, 11 octobre 1920).

dans l'hypothèse qu'elle a une épaisseur de 1 centimètre et que la différence de température sur ses deux faces est 1°. On a reconnu que la conductibilité de la peau *diminue* dans les régions glaciales, à raison du tissu graisseux qui la double.

Divers expérimentateurs ont mesuré le coefficient de conductibilité *c* des étoffes. Le plus complet et le plus correct d'entre eux est Rubner (1), qui utilisa plusieurs calorimètres de grandeurs différentes. Rubner montra, tout d'abord, que le meilleur isolant thermique est l'air; son coefficient de conductibilité est 0°,0000332. S'il était possible de garder autour de soi une couche d'air d'une épaisseur convenable, on serait protégé mieux que par un vêtement quel qu'il soit, d'égale épaisseur.

Le coefficient *c*, pour les différentes étoffes, dépend donc bien moins de leur nature que du mélange des fibres et de l'air qu'elles emprisonnent en quantité variable. Les poils, fourrures, tissus poreux, conduisent mal la chaleur, à cause de l'air qui se trouve dans leurs interstices. Du reste, à épaisseur égale, un tissu est d'autant meilleur comme isolant thermique qu'il est *moins dense*. On trouvera dans la *Technique* (§ 262) un tableau concernant cette densité, l'épaisseur des vêtements et étoffes usuels, le volume relatif d'air qu'ils immobilisent. Voici, en résumé, quelques coefficients de conductibilité moyens obtenus par Rubner (2) :

| Substances                       | Coefficient de conductibilité |
|----------------------------------|-------------------------------|
| Air.....                         | 0°,0000332                    |
| Cheveux } bruns { (de paysan) .. | { 0,0000763                   |
| } gris    {                      | { 0,0000745                   |
| Plumes (édredons) .....          | 0,0000574                     |
| Poils et crins .....             | 0,0000570                     |
| Tissu de coton lisse.....        | 0,0000810                     |
| — de laine lisse.....            | 0,0000686                     |
| — de soie lisse.....             | 0,0000684                     |
| Cachemire.....                   | 0,0000686                     |
| Batiste (lin).....               | 0,0000810                     |
| Flanelle de laine .....          | 0,0000723                     |

(1) Max Rubner (*Arch. f. Hygiène*, t. XXIV, p. 265 et suiv.; 1895).

(2) Rubner (*loc. cit.*, p. 350 à 380; tableaux, *passim*).

| Substances                        | Coefficient<br>de conductibilité |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| Tricot de laine.....              | 0 <sup>e</sup> ,0000650          |
| Flanellé de coton.....            | 0,0000757                        |
| Tricot de coton.....              | 0,0001002                        |
| — de lin.....                     | 0,0001458                        |
| — de soie.....                    | 0,0000916                        |
| Etoffes bleues d'hiver.....       | 0,0000756                        |
| — en fil pour hiver.....          | 0,0000733                        |
| — en fil pour été.....            | 0,0000714                        |
| Paletot d'hiver.....              | 0,0000676                        |
| Peau de lapin { Poils en dehors.. | 0,0000689                        |
| { Poils en dedans..               | 0,0000682                        |

Ajoutons encore quelques résultats de mesures :

| Substances                            | Coefficient<br>de conductibilité |
|---------------------------------------|----------------------------------|
| Eau (1) (vers 37°).....               | 0 <sup>e</sup> ,001350           |
| Solution de sel marin (2) à 10 0/0 .. | 0,001080                         |
| Peau humaine (3).....                 | 0,000600                         |
| Lard (graisse solide) (4).....        | 0,000480                         |
| Cuir de bœuf (5).....                 | 0,000420                         |

(voir à la *Technique* un tableau complémentaire).

Soit, à titre d'application, un homme portant un vêtement de laine ( $c = 0,0000686$ ) d'une surface totale de 19.000 centimètres carrés, d'une épaisseur de 0<sup>cm</sup>,75, et tel que sur ses deux faces la différence de température soit de 10°. Quelle sera la quantité de chaleur perdue par conductibilité en vingt-quatre heures?

On a :

$$Q = \frac{0,0000686 \times 19.000 \times 3.600 \times 24 \times 10}{0,75 \times 1.000} = 1.528 \text{ Calories.}$$

(1) Lees (*Proceed. Roy. Soc.*, t. LXII, p. 286; 1898; *Phil. Trans.*, t. CXCI, p. 399; 1898).

(2) Winckelmann (*Wied. Ann.*, t. X, p. 668; 1880).

(3) Jules Lefèvre, *Bioénergétique*, p. 398.

(4) Lees (*loc. cit.*).

(5) Lees et Chorlton (*Phil. Mag.*, t. XLI, p. 495; 1896).

On a divisé par 1.000 afin d'exprimer Q en grandes calories.

179. La surface d'une étoffe peut être substituée à celle de la peau humaine dans l'évaluation du rayonnement.

A cet effet on a mesuré les pouvoirs émissifs des différentes étoffes. Nous possédons uniquement les valeurs obtenues par Pécelet<sup>(1)</sup>. Ce savant reconnut, après Melloni, que la couleur des tissus est à peu près indifférente, sauf cependant ce fait, démontré par tous les auteurs, que le noir est le plus rayonnant.

Nous donnerons plus loin (§ 261 de la *Technique*) le tableau des pouvoirs émissifs connus. Mais les mesures de Pécelet ne sont pas à l'abri de la critique ; elles sont du reste un peu vieilles (1841). Ainsi Pécelet trouve, contrairement à des savants plus modernes :

Noir de fumée,  $K_1 = 0^{\circ},00011$  au lieu de  $0^{\circ},00016$  trouvé par Stefan et Christiansen. Pour la peau, nous prendrons  $K_1 = 0^{\circ},00015$ . Pour l'air, des déterminations récentes<sup>(2)</sup> ont donné  $K_1 = 0,000040$ . Glogner<sup>(3)</sup>, employant un calorimètre à eau, étudia le rayonnement de la peau des blancs (européens) et des nègres (Malais). La peau noire s'est montrée plus rayonnante. Ainsi, par heure et par mètre carré, on a  $17^{\text{Cal}},40$  avec les premiers, 21 Calories avec les seconds, en utilisant l'avant-bras ; rapport :

$$\frac{21}{17,4} = 1,20.$$

De même, dans un calorimètre à air, l'échauffement d'un volume donné d'air, dans le même temps, fut de 1,21 fois celui que produisit la peau de la cuisse du blanc.

Cette différence, très nette, qui permet aux hommes de race noire de perdre plus de chaleur que les Européens,

(1) Pécelet, *Traité de la chaleur*, 3<sup>e</sup> éd., 1860, t. I, p. 373 (revu par L. Ser).

(2) Moyenne, d'après Wellenmann et Exner (Acad. sciences, Vienne, 19 janvier 1911).

(3) Glogner (*Wirchow's Arch.*, t. CXVI, p. 540; 1889; — *Centrib. f. Physiol.*, t. IV, p. 102; 1891).

explique aussi leur résistance dans les climats surchauffés qu'ils habitent.

L'évaluation de la chaleur rayonnée se fait très simplement, si on remplace la loi de Newton par la *loi de Stefan*, tant de fois vérifiée<sup>(1)</sup> et qui est celle-ci :

« Le rayonnement d'une surface est proportionnel à la 4<sup>e</sup> puissance de sa température *absolue*. »

Soient  $T$  la température ordinaire de la surface,  $t$  celle du milieu extérieur. On a :

$$q_1 = K'_1 [(T + 273)^4 - (t + 273)^4].$$

Le facteur de proportionnalité  $K'_1 = 1,355 \times 10^{-12}$ , d'après A. Shakespeare;  $1,27 \times 10^{-12}$ , d'après Bauer, pour les corps « parfaitement noirs ». Il semble que, dans le cas de la peau humaine, le coefficient soit  $K'_1 = 1,02 \times 10^{-12}$  environ<sup>(2)</sup>.

Ajoutons que la température cutanée est variable de 4 à 5° suivant les régions du corps, quand celui-ci est bien couvert<sup>(3)</sup>.

**180. Coefficient d'utilité du vêtement.** — Pour évaluer l'effet protecteur d'un vêtement, sans faire état de sa matière ni de son épaisseur, Coulier<sup>(4)</sup> avait recouvert un vase cylindrique en laiton, rempli d'eau chaude, de l'étoffe à étudier. Bergonié<sup>(5)</sup> employa même un buste en cuivre, à l'intérieur duquel l'eau avait 37°. Il notait la durée  $t$  nécessaire pour que, recouvert d'un vêtement donné, le buste se refroidit de 1°. La température extérieure était 12°.

A nu, la durée serait  $\theta$ . Le rapport  $\frac{t}{\theta} = c'$  définissait le « coefficient d'utilité » ou de protection du vêtement.

(1) Par exemple, récemment : Wamsler (*Zeitsch. des Ver. deutsch. Ing.*, n° 15 et 22 : 1911).

(2) G.-A. Shakespeare (*Proceed. Roy. Lond. Soc.*, 11 janv. 1912. — Bauer et Moulin *Journ. de Physique*, 1910, p. 468). — Rubner (*Arch. f. hygiene*, t. XVI, p. 357; 1893).

(3) Benedict, Miles et Alice Johnson (*Proceed. Acad. Sc., U. S. A.*, juin 1919, V, p. 218).

(4) Coulier (*Journ. de Physiol.*, 1858, t. I).

(5) Bergonié (*Comptes Rendus Biologie*, 1904, p. 265, 314).

Bergonié obtint les coefficients pratiques suivants :

| Vêtements                         | c'   |
|-----------------------------------|------|
| Maillot de cycliste, collant..... | 1,10 |
| Chemise de laine .....            | 1,50 |
| Gilet de molleton.....            | 1,55 |
| Gilet de chasse.....              | 1,60 |
| Veston cuir noir et doublé.....   | 1,60 |
| Chemise de flanelle .....         | 1,75 |
| Veston de gros drap.....          | 1,90 |
| Mac-farlane imperméable.....      | 2,10 |
| Gilet de laine des Pyrénées ..... | 2,50 |
| Pardessus soie d'hiver.....       | 2,50 |
| Pelisse vison .....               | 4,50 |

D'une façon plus exacte, on utilisera les tableaux de Rubner, et on calculera le pouvoir protecteur d'un vêtement d'après la nature du tissu et son épaisseur.

D'ailleurs la valeur pratique, hygiénique, d'une étoffe dépend aussi de la manière dont elle se comporte à l'égard de la transpiration. Nous allons voir qu'aussi bien ce facteur que celui de la protection contre les courants d'air mettent l'utilité du vêtement en toute évidence. Cependant cette utilité ne doit pas être prise dans le sens de nécessité. Il ne faut pas abuser de la possibilité de se bien couvrir ; l'ouvrier, le paysan sont mal vêtus, insuffisamment emmitonnés et n'en souffrent pas. Montaigne rapporte qu'un homme frioleux et chaudement enveloppé vit, un jour, un gueux en chemise qui se promenait gaiement par un temps glacial. Il s'en étonna. « Mais vous, Monsieur, répondit l'autre, vous avez bien la face découverte : or moi, je suis tout face ». On s'adapte, en effet, aux conditions extérieures, et cela trempe merveilleusement la santé. La résistance aux intempéries est un facteur caractéristique de cette classe d'hommes habitués à des travaux pénibles (Voir aussi § 192).

---

### CHAPITRE III

#### LE MILIEU EXTÉRIEUR (suite)

181. Influence de l'état hygrométrique. — On appelle *état hygrométrique* de l'air à une température donnée le rapport du poids de *vapeur d'eau* qu'il contient au poids maximum qu'il pourrait contenir sous le même volume. Soient  $p$  et  $P$  ces deux poids, l'état hygrométrique sera :

$$e = \frac{p}{P}.$$

C'est, en somme, l'*humidité relative*. Dans différentes publications, on mentionne l'*état de sécheresse relative* ou le rapport  $\frac{P-p}{P}$ . Il va de soi que cet état de sécheresse atteint une valeur d'autant plus grande que  $p$  sera plus petit.

En pratique, on considère non les poids  $p$  et  $P$  de vapeur, mais les *tensions*  $f$  et  $F$  de cette vapeur, c'est-à-dire sa *force élastique* telle qu'on l'observe et telle qu'elle serait si elle était *maxima*, pour une température donnée  $t^\circ$ . L'état hygrométrique sera :

$$e = \frac{f}{F}.$$

On trouve la valeur de  $F$  pour toutes les températures dans les tables de Regnault (voir *Technique*, § 264); on mesure  $f$  au moyen d'*hygromètres* dont celui de *Crova*, le plus précis et le plus simple; son principe est le suivant : en refroidissant la vapeur de l'air, il y aura une température  $t'$  pour laquelle sa force élastique deviendra maximum; on notera donc  $t'$  au *point de rosée* où la vapeur tend à se condenser. Les tables donneront la force correspondante à  $t'$  : ce sera  $f$ .

Exemple: dans un local à 15°, le point de rosée de l'hygromètre s'est produit à  $t' = 5^\circ$ . Les tables donnent : pour  $t'$ ,  $f = 6^{\text{mm}},55$ ; pour  $t = 15^\circ$ ,  $F = 12^{\text{mm}},70$ . D'où :

$$e = \frac{f}{F} = \frac{6,55}{12,7} = 0,514, \quad \text{ou} \quad 51,4 \text{ 0/0.}$$

La connaissance de  $f$  ou de  $e$  permet de calculer le poids de vapeur d'eau par mètre cube à  $t^\circ$ . On a :

$$p = \frac{290,2 \times f}{273 + t} \text{ grammes,} \quad \text{ou} \quad p = \frac{290,2 \times F \times e}{273 + t} \text{ grammes.}$$

On verra plus loin le mode opératoire. Dans les filatures, où l'humidité est toujours élevée, on place un écheveau de laine sur une balance; plus il sera lourd, plus l'humidité sera grande. Le travail des textiles exige leur *humidification*; ce que l'on pratique au moyen « d'aérosaturateurs » qui déversent dans l'atelier un air saturé, chaud ou froid. Voici des exemples d'états hygrométriques :

*Filatures de coton :*

|   |       |         |     |
|---|-------|---------|-----|
| Salle de préparation.....                     | $e =$ | 60      | 0/0 |
| — de peignage.....                            |       | 80      | »   |
| — des revideurs.....                          |       | 55 à 60 | »   |
| — des continus.....                           |       | 65 à 70 | »   |
| Tissage du coton.....                         |       | 75 à 80 | »   |
| Filature et tissage du lin, jute, chanvre.... |       | 80 à 85 | »   |
| Filature de soie.....                         |       | 70 à 75 | »   |
| Filature et tissage de laine.....             |       | 80 à 90 | »   |

On voit que, souvent, l'air de ces ateliers est presque saturé. Et nous n'avons pas, en étudiant l'action de la température, examiné le rôle de l'humidité de l'air.

182. **Transpiration.** — C'est Rubner <sup>(1)</sup> encore qui fit les plus belles recherches sur cette question. Conformément à la

(1) Max Rubner (*Arch. f. Hygiene*, t. XVI, p. 404; 1892). — On peut consulter également H. Wolpert (*ibid.*, t. XXVI, p. 32; 1896; — t. XXXIII, p. 206; 1898); Wolpert et Broden (*ibid.*, t. XXXIX, p. 208; 1901).

notion d'équilibre physique, il reconnut que l'évaporation pulmonaire et cutanée augmente avec l'état de sécheresse de l'atmosphère. Elle devient double à peu près quand, par mètre cube d'air, il y a 5 grammes de vapeur d'eau au lieu de 9. En un mot la valeur de l'élimination de vapeur d'eau par l'organisme suit une marche inverse de celle de l'état hygrométrique. Il en est ainsi sur des sujets alimentés ou à jeun, mais l'élimination est plus rapide en cas de suralimentation.

Combinant l'influence de l'état hygrométrique et celle de la température, Rubner montre que — toutes choses égales — la température accroît l'émission d'eau ; un minimum a lieu entre 10° et 15° ; à partir de 25° l'émission est rapide ; Volpert trouve un minimum vers 18°, et un maximum à 37°.

Un phénomène d'allure analogue a été constaté chez les végétaux, ceux qui poussent au désert et que l'on qualifie de *xérophytes* (de *χερος* sec). La transpiration des plantes est plus intense au soleil qu'à l'ombre, par suite de l'absorption des rayons rouges, qui sont calorifiques ; elle peut être arrêtée dans un milieu saturé.

Chez l'homme et les animaux, l'émission de vapeur d'eau, par cela même qu'elle présente un minimum, apparaît comme un *phénomène complexe, physique et physiologique*, soumis, incontestablement, à l'action de centres nerveux. Le rôle de ces centres est de *régulariser* le débit de la « perspiration », afin de l'adapter à la défense de l'organisme contre la chaleur. Nous savons, en effet, que l'eau rejetée s'évapore à la surface de la peau en absorbant une quantité de chaleur.

La sudation est donc un facteur d'équilibre de l'organisme qui obéit, comme tous les autres, à la coordination nerveuse.

Ce serait trop grave s'il n'en était pas ainsi. La sueur est un déchet toxique, d'autant plus qu'elle se produit au cours de la fatigue (§ 163) ; par exemple, la dose de poisons qu'elle entraîne au dehors en vingt-quatre heures suffirait à mettre en danger un sujet adulte (1) ; des accidents d'empoisonne-

(1) Arloing (*Journ. de Physiol.*, 1899, p. 249, 268).

ment se produisent parfois dans une atmosphère chaude et humide parce que la sueur n'a pu quitter l'économie<sup>(1)</sup>. On comprend, dès lors, la nécessité d'une régulation, d'une émission de vapeur d'eau adaptée à des « buts biologiques ».

Dans un milieu ayant une température de 20°, un homme adulte élimine environ 900 grammes d'eau à l'état de repos, 3.000 grammes pour un travail moyen de 200.000 kilogrammètres ; dans les cas de travail exceptionnellement dur, 7 à 8 kilogrammes d'eau. Les marches en plein désert entraînent une sudation énorme, souvent désastreuse pour la santé. L'évaporation de ces quantités importantes d'eau correspond à une notable dépense de chaleur.

En résumé, toutes circonstances qui gênent la perspiration sont dangereuses : telles sont l'humidité des salles de filatures (en moyenne de 85 0/0 à une température de 23°, écrit l'inspecteur divisionnaire de Lille, M. P. Boulin)<sup>(2)</sup>, la poussière qui, comme sur les feuilles des plantes d'appartement, obstrue les pores par où s'effectue la sudation. On souffre de la *chaleur humide*<sup>(3)</sup>, dit Rubner, faute de pouvoir évaporer suffisamment, on souffre du *froid humide*, parce qu'il fait perdre trop de chaleur<sup>(4)</sup>.

Hâter l'abaissement de l'état hygrométrique par une ventilation très énergique, c'est un double profit ; car, d'une part, la sudation se produira normalement, et, d'autre part, la chaleur sera plus supportable en milieu relativement sec, vu que l'air humide la conserve plus longtemps<sup>(5)</sup>.

L'état sec de l'atmosphère est favorable au travail, surtout à une température moyenne de 15-16°, c'est dans des cas très particuliers que l'extrême sécheresse a lieu et se montre avec des caractères fâcheux. Aux grandes altitudes, elle est

(1) Haldane (*Revue scientifique* du 8 octobre 1910).

(2) P. Boulin (*Revue scientifique* du 8 avril 1911, p. 430).

(3) En divers pays, comme à Buenos-Ayres, l'humidité combinée à une température de 39° et 40° avait produit de nombreux décès en 1900 (Grandis et Mainini, *Arch. ital. Biol.*, t. XXXVII, p. 281 ; 1901) ;

(4) Rubner (*Arch. f. hygiene*, t. XXXVIII, p. 120 ; 1900).

(5) Hoorweg, Haga (*Journal de Physique*, 1877).

telle parfois que le bois éclate, les corps (cheveux, barbe) s'électrisent <sup>(1)</sup> et la peau des mains s'écaille par endroits <sup>(2)</sup>, les ongles sont cassants.

Remarquons, enfin, que les vêtements, suivant la nature de l'étoffe, absorbent plus ou moins d'eau <sup>(3)</sup> : ils modèrent l'évaporation et empêchent un brusque refroidissement.

Rubner a trouvé que la quantité maximum d'eau retenue est, par *gramme de tissu* :

|                        |                      |                     |                     |
|------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| Flanelle de laine..... | 10 <sup>sr</sup> ,30 | Tricot de soie..... | 3 <sup>sr</sup> ,80 |
| — coton....            | 6 ,90                | — lin.....          | 2 ,40               |
| Tricot de laine.....   | 4 ,80                | Coton uni.....      | 0 ,80               |
| — coton.....           | 4 ,20                |                     |                     |

La *laine*, à ce point de vue, rendrait des services précieux été comme hiver ; elle est de tradition chez les Arabes, par exemple.

**183. Influence des courants d'air.** — L'air agit sur l'homme et les animaux par sa température ; mais il intervient aussi par sa vitesse et par sa masse. Dans un air calme, la résistance de l'air est fonction de la vitesse de déplacement de l'homme. La marche du piéton à un bon pas est de 1<sup>m</sup>,50 par seconde. Or la résistance opposée par l'air, c'est-à-dire la pression qu'il exerce sur le corps en mouvement, est :

$$R = K \times S \times V^2,$$

en exprimant R en kilogrammes, V en mètres et la surface S en mètres carrés.

Quant au coefficient de résistance K, on a <sup>(4)</sup>, jusqu'aux vitesses de 42 mètres, sensiblement :  $K = 0,079$ . Pour l'homme marchant au pas, la surface effective est à peu près  $S = 0^{\text{m}^2},75$ . D'où :

$$R = 0,079 \times 1,50^2 \times 0,75 = 0^{\text{kg}},133.$$

(1) M<sup>ll</sup> de Harven (*Bull. Soc. astr. de France*, 1904, p. 173).

(2) Jean Mascart (*Revue générale des sciences*, 1910, p. 906).

(3) Rubner (*Arch. für Hygiene*, t. XV, p. 54 ; 1892).

(4) G. Eiffel, *La Résistance de l'air*, 2<sup>e</sup> éd. ; 1911.

Cela représente, par seconde, un travail inutile de :

$$0,133 \times 1,5 = 0^{\text{kgm}},20.$$

Dans la réalité, la vitesse à considérer est celle du vent, qui peut varier entre 2 et 40 mètres, suivant le moment et aussi suivant l'altitude. Elle augmente avec cette dernière. Bien entendu la vitesse de marche du piéton est, dans ces cas, négligeable. Exception doit être faite pour les courses, en bicyclette, automobiles, etc., ou même à pied.

On peut adopter 6 mètres pour la vitesse normale en plaine. C'est alors une pression  $R = 2^{\text{kg}},133$  et un travail de  $12^{\text{kgm}},80$  par seconde.

Par un fort ouragan ( $V = 40^{\text{m}}$ ), la pression de l'air atteint 95 kilogrammes et soulèverait un homme adulte, si celui-ci ne s'inclinait pas, afin de réduire sa surface et de donner, ainsi, une prise moins grande (1), et si, en même temps, il n'obliquait pas sur la direction du vent.

On mesure la vitesse des vents (2) au moyen des *anémomètres*; ils seront indiqués plus loin (*Technique*, § 208).

184. L'influence de la *vitesse des courants d'air*, à une température donnée, a été étudiée par M. Jules Lefèvre (3) après d'Arsonval : il place un homme dans un couloir de ventilation (voir *Technique*, § 261) sous un courant d'air de masse et de vitesse connues; il note la température de cet air en amont et en aval. Soit  $M$  la masse totale de l'air qui a circulé en  $t$  minutes et s'est échauffée de  $0^{\circ}$ . En multipliant cet excès de température  $0^{\circ}$  par la *chaleur spécifique* 0,237 de l'air

(1) Cette inclinaison sur l'horizontale constitue « l'angle d'attaque ». La résistance  $R$  aura donc pour expression :

$$R = K \times S \times V^2 \times \sin \alpha;$$

elle diminue par suite avec la valeur de l'angle  $\alpha$ , mais jusqu'à  $\alpha = 30^{\circ}$  seulement (G. Eiffel).

(2) On dit également : *force des vents*, substituant pression à vitesse.

(3) Jules Lefèvre, *Bioénergétique* (*loc. cit.*, p. 103, 405, 426). — Consulter également d'Arsonval (*Arch. de Physiol.*, 1894, p. 360), Léon Frédéricq (*Arch. Biol.*, 1882, t. III, p. 685).

(§ 110), on obtient le nombre de calories absorbées par l'air, c'est-à-dire abandonnées par le sujet. Par heure, ce sera :

$$Q = \frac{0,237 \times \theta \times M}{t} \times 60 \text{ en calories.}$$

Voici un tableau de quelques résultats de ce genre, sur un adulte :

| VITESSE<br>du<br>VENT | TEMPÉRA-<br>TURE<br>DE L'AIR | PAR HEURE<br>EN GRANDES CALORIES |            | RAPPORTS                   |                          |
|-----------------------|------------------------------|----------------------------------|------------|----------------------------|--------------------------|
|                       |                              | Corps nu                         | Corps vêtu | A                          | B                        |
| 1 <sup>m</sup> ,20    | 9°                           | 134                              | 98         | $\frac{201}{134} = 1,50$   | $\frac{134}{98} = 1,36$  |
| 3 ,80                 | id.                          | 201                              | 130        |                            | $\frac{130}{98} = 1,32$  |
| 1 ,50                 | 5°                           | 185                              | 143        | $\frac{277,5}{185} = 1,50$ | $\frac{185}{148} = 1,30$ |
| 3 ,80                 | id.                          | 277,50                           | 172        |                            | $\frac{172}{143} = 1,20$ |
| 4 ,00                 | 4°                           | 313                              | 170        |                            | $\frac{313}{170} = 1,84$ |

Il est aisé de remarquer que la thermogénèse a augmenté avec l'abaissement de la température et aussi avec l'accroissement de la vitesse du vent. Que l'augmentation dont il s'agit est, toutes choses égales, moins grande pour l'homme habillé (assez légèrement), que nu (rapports A) : c'est une démonstration du rôle protecteur du vêtement; enfin que cette protection s'exerce d'autant plus que le courant est plus froid (rapports B) : le coefficient d'utilité, égal à 1,54 à 9°, devient, 1,61 et 1,84 à 5° et à 4°, la vitesse étant sensiblement constante (3<sup>m</sup>,80 à 4 mètres).

Le premier de ces résultats — protection contre l'effet de la vitesse — s'explique si l'on songe que l'air s'engouffre davantage dans les vêtements et y forme un matelas mauvais conducteur. Le second — protection croissante avec le

froid — tient à ce que l'air froid est plus mauvais conducteur que l'air chaud.

L'excès de dépense calorifique, nécessité par l'excès de vitesse du courant d'air, correspond au travail de celui-ci sur le corps du sujet, travail qui s'élève par heure à 10.000 ou 12.000 kilogrammètres, environ 30 Calories (pour  $V = 3$  à 4 mètres par seconde) et à la convection.

Aux grandes altitudes, à l'air libre, la dépense calorifique est donc nettement supérieure à celle de la vie enfermée, de la cité, du bureau, de l'atelier.

185. Considérons une vitesse constante de 5<sup>m</sup>,50 à 4 mètres tout au plus, et voyons la loi d'accroissement de la dépense

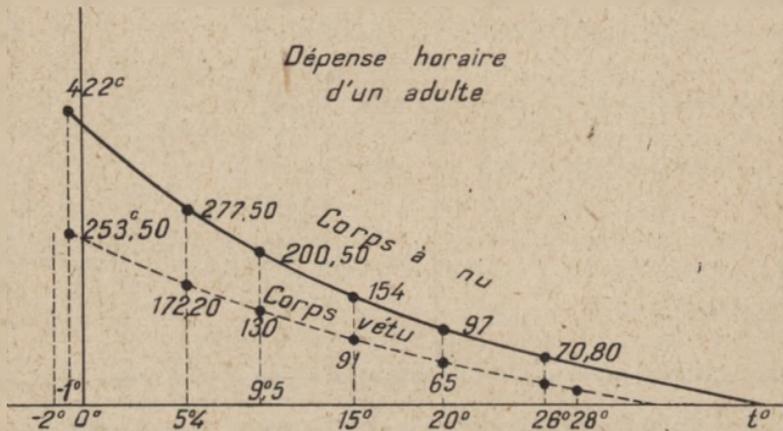


FIG. 150.

en fonction de la température (fig. 145). Un homme adulte, suivant qu'il aura le corps nu ou revêtu d'un costume léger, dépensera par heure les quantités de chaleur marquées sur le graphique ci-dessus.

Ces quantités représentent la perte par transmission, la dépense calorifique totale. Dans un milieu à 20°, on aurait :  $97^{\text{Cal}} \times 24 = 2.328$  Calories. Comme nous avons calculé une perte moyenne de 1.500 calories pour le rayonnement et la convection, il resterait 828 Calories pour la *dépense physiologique minimum* (§ 174); elle est donc, cette dépense, voisine de  $900^{\text{Cal}}$  chez l'adulte, mais pas supérieure.

186. **Influence de l'eau et des bains.** — Les circonstances dans lesquelles un homme travaille immergé dans l'eau sont rares. Chez les nageurs, la dépense énergétique est modifiée par la *force* du courant et la température de l'eau; la résistance à vaincre est :

$$R = K \times S \times V^2,$$

avec  $K = 73$ , d'après la *forme* du corps humain et la densité, 1,028 en moyenne, de l'eau de mer (1);  $S$  est égal à  $0^m^2,035$  environ; dans un courant de 4 mètres, on aurait :

$$R = 73 \times 0,035 \times 16 = 41 \text{ kilogrammes.}$$

Si l'eau est *calme*, il faudrait considérer les actions *chimiques* et *thermiques* seulement; les premières interviennent par des phénomènes d'échanges *osmotiques* entre les sels de l'organisme et l'eau, surtout quand celle-ci en contient à son tour (mers). Les secondes sont plus sensibles. Jules Lefèvre en a fait une bonne étude : un sujet est immergé dans une masse d'eau  $M$  contenue dans une baignoire; il en élève la température de  $\theta^\circ$  en  $t$  minutes. La chaleur spécifique de l'eau étant l'unité, on aura une dépense horaire :

$$Q = \frac{M \times \theta}{t} \times 60.$$

Le sujet, en faisant osciller son tronc 25 fois par minute, agitait l'eau de la baignoire; mais il troublait, par ces contractions musculaires, les conditions de repos. Lefèvre établit, cependant, que la production calorifique suit une marche inverse de celle de la température du bain. Le débit thermique par *minute* serait donné, approximativement, par la formule suivante :

$$q = 22^{\text{Cal}},566 - 0,843t - 0,0178t^2 + 0,00124t^3 - 0,000016t^4.$$

(1) D'autres auteurs adoptent  $K = 55$ , ce qui abaisse la valeur de la résistance  $R$ . Remarquons aussi que  $S$  est la surface de la plus grande section du corps plongé et que  $R$  est exprimé en kilogrammes.

Elle se vérifie entre  $+ 5^{\circ}$  et  $+ 34^{\circ}$ ; on observe, en outre, que la température du bain *hyperhémie* (rougit) la peau, sauf dans l'intervalle  $25^{\circ}$ - $35^{\circ}$ ; d'où il résulte que cette hyperhémie n'est pas en cause dans la thermogénèse.

Voici un tableau des débits par minute :

|                |                      |                     |                    |                |                |
|----------------|----------------------|---------------------|--------------------|----------------|----------------|
| Température... | $+ 5^{\circ}$        | $12^{\circ}$        | $18^{\circ}$       | $24^{\circ}$   | $30^{\circ}$   |
| q par 1'.....  | $18^{\text{Cal}},03$ | $11^{\text{Cal}},7$ | $7^{\text{Cal}},2$ | $4^{\text{C}}$ | $2^{\text{C}}$ |

Remarquons, en passant, que la loi de Lefèvre comme le graphique (fig. 150) conduiraient, pour une température de  $35^{\circ}$ , à une production calorifique de 1.200 Calories en vingt-quatre heures. Expérimentalement, ce savant a trouvé 1.500 Calories, en moyenne, soit par la précédente détermination, soit par la dépense d'oxygène (1). L'énergie physiologique est donc évaluée, par lui, à 1.500 Calories, au lieu de 900 Calories tout au plus (§ 185) que nous admettons (2); ce sont les contractions musculaires, le frisson, qui ont faussé les mesures de l'auteur.

Nous dirons pour l'influence de l'eau, comme pour celle de l'air, qu'elles sont relativement plus sensibles sur les petites tailles que sur les grandes, car ce sont des *actions de surface*.

**187. Influence de l'altitude.** — La pression atmosphérique, définie plus haut (§ 172), se mesure au *baromètre* (*Technique*, § 255). Elle est fonction de l'altitude du lieu, diminuant quand cette altitude augmente, augmentant, par conséquent, à mesure qu'on s'enfonce dans le sol.

La température de l'air est une fonction analogue, car il fait d'autant plus froid qu'on s'élève plus haut, et inversement, il fait de plus en plus chaud à mesure qu'on pénètre dans les profondeurs. On admet, à titre d'indication approchée, que la température s'abaisse de  $1^{\circ}$  quand on s'élève de *180 mètres au-dessus du sol*; elle augmente de  $1^{\circ}$  lorsqu'on s'enfonce de *33 mètres au-dessous* du sol.

Plus exactement, la pression barométrique et la température d'un lieu sont fonctions de son altitude et de sa latitude. Connaissant les pressions du baromètre au bas et au sommet d'une mon-

(1) Jules Lefèvre (*loc. cit.*, p. 907-908), et pour l'action des bains (p. 417-422). — Voir aussi § 262.

(2) La valeur 1.500 Calories est même supérieure à la dépense calorifique *totale* durant le repos du sommeil (§ 111).

tagne, ainsi que les températures, soient  $H, H'$  et  $t, t'$ , et sachant la latitude  $\lambda$ , la *formule de Laplace* permet d'en déduire la valeur de l'altitude  $A$ . On a :

$$A = 18.405^m (1 + 0,002552 \cos 2\lambda) \left( 1 + \frac{t + t'}{500} \right) \log \frac{H}{H'}$$

Réciproquement, on déduira de  $A$  et des autres facteurs la valeur de  $H$ .

On ne doit jamais indiquer, pour pouvoir comparer un lieu à un autre, la hauteur  $A$  comme on vient de la calculer. Il importe de tenir compte de la position du pied de la montagne par rapport au niveau de la mer ; si elle est à  $B$  mètres au-dessus de ce niveau, la hauteur vraie sera :  $A + B$ . C'est ce qu'on appelle l'*altitude réduite* (réduite au niveau de la mer).

Pour la température, sa variation avec l'altitude est troublée par nombre de facteurs difficiles à connaître exactement. Le régime des vents, la position même du lieu à l'égard de son entourage sont des *variables* mal déterminées.

La variation de la température avec la profondeur n'est pas moins irrégulière. On aurait pu la calculer en l'assimilant à la propagation d'une onde à travers un corps solide, onde émise par la radiation calorifique de la surface ; on aurait alors trouvé un amortissement de cette onde tel que, à la profondeur de 25 à 30 mètres, plus rien ne se fait sentir de la chaleur du dehors. L'expérience a montré, effectivement, que, vers 30 mètres, dans nos climats, on atteint une *couche invariable*. Par exemple, une cave située à cette profondeur aurait une température constante, été comme hiver.

Mais, au-dessous de la couche invariable, la chaleur du sol augmente avec la profondeur, de  $1^\circ$  par 33 mètres en moyenne. Les écarts sont toutefois notables. Ainsi on donne  $1^\circ$  par 25 mètres dans les mines de Sperenberg, près de Postdam, jusqu'à 628 mètres ; au delà, c'est  $1^\circ$  par 31 mètres, puis  $1^\circ$  par 64 mètres. Dans les puits d'Anzin, on note  $1^\circ$  par 15 à 26 mètres : dans les mines de Neuffen, en Wurtemberg,  $1^\circ$  par 41 mètres. Les résultats sont plus exacts en mesurant la température des puits artésiens : celui de Grenelle, profond de 548 mètres, a une eau à  $27^\circ,70$ , soit  $1^\circ$  par 30 mètres, en déduisant des  $27^\circ,70$  la température à la surface extérieure. La mine de Morro Velho, au Brésil, est profonde de 1.800 mètres, et la température y atteint  $45^\circ$ .

L'homme qui effectue une ascension, en montagne, en ballon, en aéroplane, ou qui descend dans une galerie de mines, aura donc à compter avec un changement de pression atmosphérique et de température. Ce changement, suivant la *vitesse* avec laquelle il se déplacera, sera *lent* ou *rapide*. Il est utile de retenir ce facteur vitesse auquel on

attribue, non sans raison, certaines des conséquences de l'altitude.

Les variations de pression modifient la teneur de l'air en gaz oxygène. Normalement, il y a 300 grammes d'oxygène par mètre cube d'air à la pression de 760 millimètres et à 0°. Si la pression tombe de moitié, à 380 millimètres, il n'y en aura plus que 150 grammes environ. Cet appauvrissement de l'air a-t-il un retentissement physiologique chez l'homme ?

L'air comprimé est, au contraire, plus riche en oxygène que dans les conditions normales. Quel est son effet sur l'organisme ? Autant de questions que nous allons éclaircir brièvement.

**188. Effets de la pression atmosphérique.** — Soit d'abord le cas de la dépression barométrique. Elle entraîne une diminution de la proportion normale d'oxygène. Or, jusqu'à 115 grammes par mètre cube, la respiration ne se trouble nullement. On l'a constaté aussi bien en maintenant la pression à 760 et appauvrissant de plus en plus la teneur en oxygène <sup>(1)</sup> qu'en laissant tomber à la fois la pression et la proportion de ce gaz <sup>(2)</sup>.

La limite de 115 grammes correspond à une pression de 290 millimètres environ, ou une altitude moyenne de 7.680 mètres. Jusque-là nous pouvons donc admettre que les globules rouges du sang remplissent normalement leur fonction de véhicules de l'oxygène et que les combustions intra-organiques conservent leur caractère de régularité.

Toutefois, à ces grandes altitudes de 1.500 mètres à quelques milliers de mètres, le nombre des globules rouges augmente <sup>(3)</sup>, et par cet accroissement de leur surface totale, ils suppléent à l'abaissement de la proportion d'oxygène. Par exemple, Mercier <sup>(4)</sup> a constaté sur lui-même, à Zurich (Z), par une altitude de 412 mètres, qu'un millimètre cube de sang contient

<sup>(1)</sup> Paul Bert, *La pression atmosphérique*, 1878, p. 654 ; Speck, *Physiol. d. menschl. athmens*, Leipzig, 1892, p. 123 ; J. Tissot (*Comptes Rendus Biologie*, 1904, p. 876, 941).

<sup>(2)</sup> J. Tissot, (*ibid.*, 1902, p. 682, 688).

<sup>(3)</sup> Viault (*Comptes Rendus Acad. Sciences*, 1890, t. CXI, p. 917).

<sup>(4)</sup> A. Mercier (*Arch. de Physiol.*, 1874, p. 769).



baromètre. Mais il va de soi que, pour consommer la même masse d'oxygène, la ventilation a besoin d'être plus ample, le travail respiratoire plus intense. Et c'est probablement pourquoi Zuntz et Durig, faisant l'ascension du pic de Teyde (3.700 mètres), au Ténériffe, trouvèrent que la dépense d'oxygène y est plus forte qu'au pied de la montagne, cela aussi bien au repos qu'en effectuant un travail <sup>(1)</sup>. Mosso <sup>(2)</sup> avait déjà constaté, sur le mont Rose, à 4.560 mètres ou une pression de 428 millimètres, que les pulsations et les respirations sont modifiées, et que la *capacite vitale* subit une légère diminution. Prenant un tracé ergographique de la fatigue, il y décela des *irrégularites* qui semblent démontrer que « sur les hauteurs, le système nerveux fonctionne moins bien quant à ses centres moteurs ». Dans les cas où l'homme doit produire un travail mécanique considérable, il est évident que l'activité respiratoire sera pénible <sup>(3)</sup>. Les gaz expirés se montrent relativement riches en gaz carbonique, et pauvres en oxygène; par contre, le sang est d'autant plus pauvre en gaz carbonique qu'on s'élève plus haut; il y a, suivant le mot de A. Mosso, tendance à l'*acapnie* <sup>(4)</sup> ( $\alpha$  et  $\chi$   $\alpha$   $\nu$   $\rho$   $\sigma$ , fumée). Les centres nerveux, irrigués par un sang acapnique, présentent les irrégularités d'action que nous avons signalées.

189. **Mal d'altitude.** — Les troubles dus à l'altitude sont appelés « mal d'altitude », « mal des montagnes » (la *puna* des Américains du Sud) <sup>(5)</sup> ou encore « mal des aviateurs ». Déjà aux environs d'une pression de 400 millimètres, ils consistent en nausées, accélération du cœur et de la respiration, difficulté des mouvements; la sensibilité et l'intelligence sont légèrement émoussées; et il y a menace d'asphyxie déterminant la mort à une altitude de 8.500 mètres.

<sup>(1)</sup> Jean Mascart (*Rev. gén. sciences*, 1910, p. 633).

<sup>(2)</sup> A. Mosso, *Fisiologia del uomo sulle Alpi*, 1897, Milano, p. 7, 11, 37, 46.

<sup>(3)</sup> L. Hill (*Nature*, t. LXXXIV; 1910).

<sup>(4)</sup> A. Mosso (*Arch. ital. Biol.*, 1901); Haldane (*Proceed. Lond. R. Soc.*, 18 janvier 1912).

<sup>(5)</sup> V. Ducceschi (*Arch. di Fisiol.*, 1912, t. X, p. 78-113, et t. XIV, 1<sup>er</sup> janv. 1916). — *Puna* veut dire *élévation*.

Raoul Bayeux <sup>(1)</sup> a montré que la chute de pression *réduit* l'*oxy-hémoglobine* du sang, comme il résulte de *photographies autochromes* de ce sang, et que le mal d'altitude guérit par injection hypodermique de liquides suroxygénés, en petites masses.

De Humboldt <sup>(2)</sup> croyait, d'après une expérience incertaine des frères Weber, que la pression atmosphérique maintenait le contact des surfaces articulaires <sup>(3)</sup>, et que ce serait pourquoi les mouvements sont difficiles quand la pression baisse, au haut des montagnes.

En réalité, la fatigue est ici d'origine respiratoire, et l'on éprouve d'autant plus le mal d'altitude qu'on fournit un plus grand travail d'ascension. Se faisant porter au sommet du Mont Blanc, Janssen n'eut aucun malaise; les alpinistes l'ont à 2.000 mètres et parfois à 4.500 mètres. Les aéronautes, dont la dépense d'énergie est faible, ne l'éprouvent que bien plus haut. Les aviateurs, dont les muscles et les nerfs sont soumis à une tension permanente, sont très exposés, le plus exposés au mal d'altitude.

Dès 1.200 mètres, ils souffrent de bourdonnements d'oreilles, de maux de tête, d'une forte cuisson à la figure; ils sont accablés, et leurs yeux se ferment impérieusement de sommeil, aussitôt qu'ils sont redescendus à terre <sup>(4)</sup>. Chez eux, d'ailleurs, l'effet du changement de pression est brusque, surtout à la descente. Par exemple, l'aviateur Chavez mit 19 minutes pour s'élever de 880 mètres à 2.010 mètres; Morane atteignit 2.600 mètres en 24 minutes, qu'il descendit en 2 minutes seulement (!), etc. Ces variations soudaines de la pression sont une des causes des troubles observés. Pour achever d'éclaircir ce sujet, il convient de mentionner le *froid*, le *vent* qui augmentent avec la hauteur d'ascension, la *sécheresse* et, si l'on en croit Knocke, l'*ionisation* de l'air. Cependant aucun fait ne permet d'y voir des causes du mal d'altitude.

(1) R. Bayeux (*Comptes Rendus Sciences*, 3 juin 1912).

(2) *Comptes Rendus Sciences*, t. IV, p. 181; 1837.

(3) Il s'agissait des articulations coxo-fémorales (hanches).

(4) René Cruchet et H. Moulinier (*Revue scientifique*, 1911, p. 740).

— *Le mal des aviateurs* (Paris, 1920).

190. La *fatigue* est, en définitive, la vraie source des troubles physiologiques qui caractérisent ce mal <sup>(1)</sup>. Elle se produit assez vite par suite, peut-être, de l'abaissement de tension de l'oxygène, de sa rareté dans l'atmosphère. Il s'ensuit que l'homme n'est pas capable de la même somme de travail mécanique aux grandes hauteurs. Aux mines de Burlard, à Sentein, on se trouve à 2.600 mètres, et un parcours de 600 mètres seulement, pour atteindre les galeries, produit l'essoufflement <sup>(2)</sup>.

L'expérience de Bayeux explique cette fatigue. Bancroft <sup>(3)</sup> montre, à son tour, que l'affinité de l'hémoglobine du sang pour l'oxygène diminue avec l'altitude en même temps que l'*alcalinité* de ce liquide, alcalinité qui favorise la fixation de l'oxygène.

On évalue à 15 0/0 la diminution de puissance des ouvriers vivant à 2.500 mètres, même quand ils sont originaires de hauteurs de 700 à 800 mètres. Aux mines de Caylloma (sud du Pérou), l'exploitation a lieu entre 4.500 et 4.900 mètres; le travail des forgerons, charpentiers, boiseurs, mécaniciens s'y abaisse de *moitié*. En pratique, disent Tréfois et Fox, on peut admettre « qu'aux grandes altitudes, l'équivalent dynamique d'un ouvrier se trouve abaissé considérablement par le seul effet de la raréfaction. »

Mais le *froid* est, pour une part, dans cette dépréciation. En laissant de côté les froids exceptionnels (— 40°) des mines de Laponie, Sibérie, Alaska, Groenland, il faut compter avec les neiges abondantes entre 2.000 et 3.000 mètres, et qui atteignent une épaisseur de 8 à 10 mètres en hiver (mines de Picos, en Espagne; des Pyrénées, en France; de Vallauria, en Italie, etc.). Les ouvriers les mieux payés refusent de se plier à ce régime glacial; les soldats des postes alpins n'y résistent que médiocrement, et encombrant les

(1) Voir un article intéressant de Kronecker sur la *Nature du mal des montagnes et un cas rare de ce mal*, dans *Biologische Centralblatt* (t. XXXI, 1911).

(2) G. Tréfois (*Revue univ. des Mines*, juillet 1910, p. 38; Liège). Sentein se trouve dans l'Ariège.

(3) Bancroft (*Journal de Physiol.*, t. XLII, p. 44; 1911. — *Proceed. Roy. Soc. London*, 18 janvier 1912).

infirmières. De fait, « dans la zone tempérée, une mine à grande altitude, à 5.000 mètres, serait absolument inexploitable, même une mine de louis d'or tout battus ».

Ainsi le froid, la fatigue, le défaut d'oxygénation du sang, peut-être la crainte du *danger* (1), produisent le mal d'altitude.

Il est intéressant de noter que les moteurs à combustion interne de l'industrie subissent une diminution de puissance, pouvant aller de 11 à 25 0/0 aux altitudes de 1.000 à 5.000 mètres (§ 176).

Le problème du mal d'altitude ne serait pas dans les préoccupations de la science si l'aviation n'était pas devenue une arme pour la défense nationale, et un mode de travail pour les ouvriers aviateurs que les constructeurs d'aéroplanes emploient de plus en plus (2). Ces lignes, que nous écrivions en 1912, ne sont que trop véridiques aujourd'hui.

Les phénomènes qui accompagnent une descente rapide de l'aviateur sont des plus curieux; et ils méritent une étude d'autant plus attentive que l'aéroplane s'élève parfois à plus de 5.000 mètres (aviateur Garros, le 5 septembre 1912) et que, descendant *très vite*, il expose l'homme à des troubles se traduisant par de la cuisson au visage, etc. (voir ci-dessus); on pourrait en donner une explication mécanique, qui doit être en majeure partie fondée. Tout d'abord, considérons la chute d'un corps animé d'une accélération  $\gamma$ ; si ce corps supportait un poids, la pression de ce poids se réduirait à  $m(g - \gamma)$  au lieu d'être  $mg$ . Rapprochons cet exemple de ce qui a lieu dans le corps humain; le sang est un liquide dont toutes les particules pressent intérieurement avec une force  $mg$ ; dans la descente accélérée de l'aviateur, cette force se réduit à  $m(g - \gamma)$ , et pour une grande accélération tout se passerait comme si notre sang n'avait plus de poids; il doit en résulter une sensation particulière de cuisson au visage où le sang arrivera sous une impulsion cardiaque en apparence plus forte, et une sensation de froid aux jambes très probablement.

Bien entendu, si l'explication que nous donnons est véritable, il s'ensuit que la descente à vitesse *constante*, sans accélération, supprimera les troubles dont souffre l'aviateur. Mentionnons que, cinq ans plus tard, G. Ferry (3) a vérifié sur *lui-même* ce que nous disions des inconvénients d'une dénivellation trop brusque.

(1) D'Hombres Firmas (*Comptes Rendus Sciences*, t. III, p. 382; 1836).

(2) H. de Graffigny, *Hygiène pratique et physiologie de l'aviateur et de l'aéronaute*, préface de Ch. Richet; Paris, Maloine, 1912.

(3) G. Ferry (*Soc. de Méd. de Nancy*, 24 nov. 1918).

## CHAPITRE IV

### LE MILIEU EXTÉRIEUR (Suite)

191. La pression atmosphérique dans les profondeurs. **Surpression et compression.** — En pénétrant dans le sous-sol, par des galeries de mines, la pression atmosphérique y sera plus grande qu'au dehors. L'augmentation de la proportion d'oxygène dans l'air, qui s'ensuit, ne modifie pas du tout la valeur des échanges respiratoires. En un mot, aux profondeurs ordinaires de la mine, ce ne peut être la pression qui occasionne les troubles physiologiques. D'autant plus que cette *surpression* est extrêmement faible; le taux d'oxygène varie donc fort peu, et l'expérience avait clairement démontré que la respiration, même dans l'*oxygène pur*, reste normale (1). A peine a-t-on signalé, dans ce dernier cas, que le sang se sursature momentanément (2); mais ce phénomène doit être absolument fugace ayant échappé à nombre d'observateurs (3).

Loin d'être en contact avec une atmosphère suroxygénée, les mineurs, les carriers, sont, les premiers surtout, exposés à respirer des gaz délétères, notamment de l'oxyde de carbone et du formène (*grisou*). Ce qui exerce sur eux une influence certaine, c'est, d'une part, la *chaleur* et l'*humidité* du sous-sol, d'autre part l'*obscurité*.

La chaleur est due à la profondeur. Si, au dehors, la tem-

(1) Regnault (*Ann. Ch. Phys.*, 1849, t. XXVI, p. 299); de Saint-Martin (*Rech. expér. sur la respiration*, Paris, 1893, p. 96); Leon Frédéricq (livre jubilaire publié par la Soc. de méd. de Gand, 1884).

(2) Falloise (*Trav. Lab. Frédéricq*, 1896-1901); A. Durig (*Arch. f. Physiol.*, 1903, suppl. p. 209).

(3) Schaternikoff (*Arch. f. Physiol.*, 1904, suppl. p. 133).

pérature est de 10°, en s'enfonçant de 1.500 mètres, on se trouve dans un milieu à 50°-55° environ. L'humidité y est également à un degré plus élevé. Le travail dans une atmosphère chaude et humide est, d'après ce qui a été expliqué déjà, très pénible (§ 182). Dans de telles conditions, 25° sont une limite à peine supportable; de sorte qu'à partir d'une profondeur de 700 à 800 mètres, on est obligé de réfrigérer en envoyant, dans les quartiers les plus chauds de la mine, un air froid qui se mélangera à l'autre. On dispose, à cet effet, de modèles variés de machines frigorifiques à air (1).

Quant au rôle de l'obscurité, il sera examiné plus tard (§ 195).

On ne saurait dire de l'air fortement comprimé qu'il ne présente pas plus de dangers que l'air légèrement surpressé de la mine. C'est que la proportion d'oxygène, qui augmente ici notablement, n'est pas en cause, et nous savons d'ailleurs qu'elle n'entraîne pas de conséquence. Mais il n'est nullement indifférent que l'organisme subisse des compressions et des détente successives, surtout si elles se produisent brusquement, sans de grandes, de très grandes précautions. Les troubles qui marquent le séjour dans l'air comprimé peuvent être extrêmement sérieux. Ils se manifestent chez les ouvriers qui travaillent dans les cloches à plongeurs, les scaphandriers. C'est la « maladie des caissons ». Les ouvriers pénètrent dans la cloche après que l'air comprimé en a chassé l'eau peu à peu. La compression à réaliser dépend évidemment de la profondeur à laquelle on devra travailler. Elle est de 1 atmosphère par 10<sup>m</sup>,33. Mais il est rare que l'on travaille à plus de 5 atmosphères.

Or, dans ces circonstances, la tension artérielle augmente (2), la respiration se ralentit, et conséquemment l'intensité des combustions intra-organiques. Le sang dissout une quantité de gaz plus grande, c'est-à-dire de l'azote et de l'oxygène. Ainsi on trouve, comparativement, dans le sang :

|                            |        |         |
|----------------------------|--------|---------|
| A la pression normale..... | 20 0/0 | 2,2 0/0 |
| A 6 atmosphères.....       | 23     | 6,5     |

(1) Dietz (*Zeitsch. f. die gesamte Kaelte-Industrie*, décembre 1914).

(2) A. Javal (*C. R. Acad. Sc.*, 22 nov, 1913).

En d'autres termes, par litre de sang circulant il y a un excès de 30 centimètres cubes d'oxygène et de 43 centimètres cubes d'azote. Pour un adulte, le sang représente un volume total de 4.500 centimètres cubes en moyenne; d'où 135 et 194 centimètres cubes de gaz qui tendront, au moment de la décompression, à quitter le sang, à se dégager dans le tissu cellulaire. Cela occasionne, chez les ouvriers, des piqûres, des démangeaisons, parfois des tuméfactions. Le plus redoutable est, effectivement, le moment de la décompression. « On ne paie qu'en sortant ».

Ces embolies gazeuses peuvent être mortelles; elles sont plus graves et plus fréquentes chez les sujets gras. L'azote en est l'élément constituant, car l'oxygène demeure fixé sur les tissus. Hill a même préconisé les inhalations d'oxygène pour faciliter le départ de l'azote sans dangers graves (1).

D'autres accidents, peu sérieux à la vérité, se manifestent à la plongée : c'est un *tintement* dans les oreilles, quelquefois douloureux, mais que les ouvriers font disparaître par un mouvement de déglutition. Nous n'insisterons pas sur tous ces faits qui ressortissent à l'hygiène industrielle(2). Nous avons simplement voulu signaler le ralentissement du phénomène d'oxydation qui est la source unique de l'énergie, et par cela même la diminution de capacité dynamique de l'homme. Cette diminution n'a pas été exactement évaluée. Les « tubistes » se plaignent, enfin, d'une certaine rigidité aux articulations qui embarrasse leurs mouvements.

**192. Influence des gaz et vapeurs délétères.** — L'atmosphère dont nous avons donné plus haut (§ 172) la composition théorique, qui répond à son état de pureté, n'est effectivement jamais pure dans les endroits où se réunissent et où travaillent les hommes.

Les gaz carbonique et oxyde de carbone sont ceux qui la vicie le plus souvent; le premier n'est dangereux qu'à forte dose; mais le second, qui a la propriété de se fixer énergiquement sur l'hémoglobine du sang, est un poison redoutable, même à la dose de 0,2 à 0,3 0/0 du mélange atmosphé-

(1) *Revue gén. des Sciences*, 1910, p. 954. — Voir un article de L. Hill, dans *British medical Journal* du 17 février 1912.

(2) Sur le mal des caissons, Glibert (*Bull. Assoc. Belge Méd. sociale*, 1914, p. 1).

rique; il l'est d'autant plus qu'il s'agit d'un homme plus fatigué<sup>(1)</sup>. L'oxyde de carbone est malheureusement présent un peu partout : il y en a de 5 à 9 0/0 dans le gaz d'éclairage; il s'en forme dans les mines de houille, les fours à chaux, les hauts fourneaux, les tunnels mal aérés, dans la combustion des braseros et des réchauds sans hotte, dans les cheminées à mauvais tirage ou à combustion incomplète, dans les poêles en fonte ou en fer. Les accidents frappent, naturellement, les gaziers, mineurs, pompiers, cuisinières, pâtisseries, repasseuses, etc. Et ces accidents sont : bleuissement du visage (cyanose), vertiges et hallucinations, une vie ralentie et une diminution considérable des forces, parfois des troubles nerveux et paralytiques.

Des traitements métallurgiques il se dégage souvent des vapeurs plus ou moins dangereuses : celles du *plomb* et du *mercure* sont au premier rang. Le Dr Hollande, de Chambéry, a signalé encore les vapeurs de *gaz fluorhydrique* que donne le traitement de l'aluminium; elles détermineraient, sur les ouvriers, une sorte de diabète<sup>(2)</sup>.

Des vapeurs d'*anhydride sulfureux*, provenant des accumulateurs électriques (dans les tramways, les usines), des phosphates et engrais phosphatés, répandent des odeurs très fortes, corrosives, parfois suffocantes. Les variations de la pression atmosphérique, la chaleur, le *champ électrique* accroissent leur pouvoir odorant<sup>(3)</sup>.

De même les fosses d'aisance, les égouts sont des causes d'asphyxie; mais il semble que, dans ce cas, ce soit le *manque d'oxygène* qui est grave, et non la présence de traces insignifiantes d'hydrogène sulfuré<sup>(4)</sup>. Des vapeurs *cyanhydriques* dangereuses s'échappent des moteurs d'automobiles, et intoxiquent les centres nerveux (bulbe).

En principe les gaz et vapeurs que nous venons d'indiquer gênent les échanges respiratoires<sup>(5)</sup>, déterminent un commen-

(1) Haldane (*Journal of Physiology*, t. XVIII, p. 463; 1895); A. Mosso (*Comptes Rendus Acad. Sc.*, 1900. — *Arch. ital. Biol.* t. XXXV, p. 1, 1901).

(2) *La Nature* du 16 septembre 1911.

(3) Boudouard (*Comptes Rendus Acad. Sc.*, 22 janv. 1912, p. 238).

(4) Hanriot (*Comptes Rendus Biologie*, 1902, p. 208-210).

(5) Paul Bert (*Comptes Rendus Biologie*, 1884, p. 565).

cement d'anesthésie (gaz carbonique) ou d'asphyxie, un engourdissement qui déprime la force musculaire.

Ajoutons ce curieux renseignement, que les étoffes de laine *bleue* ou *noire* retiennent les odeurs beaucoup plus que les rouges ou jaunes, surtout que les blanches<sup>(1)</sup>.

193. Les ouvriers (graveurs, tourneurs, luthiers), qui fabriquent des navettes en *buis* (*Gonioma Kamassi*), sont exposés à un empoisonnement nerveux : le *buis* contient, en effet, un alcaloïde *paralysant*, analogue au curare, qui frappe les centres du cerveau et de la moelle. Cet alcaloïde y est dans la proportion de 0,07 0/0, et les *buis* exotiques, ceux du Cap par exemple, sont les plus nocifs<sup>(2)</sup>. Mais son action sur les muscles est très faible.

Les *bois* toxiques sont nombreux : l'*if commun*, bois d'ébénisterie ; le *genévrier sabine*, qui sert en tabletterie et pour la fabrication des crayons, le *cytise faux ébénier*, employé en marquetterie et pour le travail au tour ; les divers bois de rose, le bois de muscadier, le bois d'amaranthe, le bois d'acajou, etc. A la migraine, à la torpeur, le maniement de tous ces bois ajoute une certaine *lassitude*<sup>(3)</sup>, qui réduit singulièrement le travail des ouvriers.

Signalons ce fait oublié que Hubert inventa, vers 1810, une machine pour peigner le *chanvre*, si dangereux pour la santé des ouvriers.

L'*opium* et le *tabac* occupent une place tristement privilégiée dans cette série de corps déprimants. Le principe de l'*opium* est la *morphine*, qui agit comme stupefiant.

Le principe actif du *tabac* est la *nicotine* ; il y en a 2 0/0 dans le *tabac* de la Havane, 2,3 0/0 dans le Maryland, 6,6 0/0 et 8 0/0 dans le Nord et le Lot, soit pour les *tabacs* français une moyenne de 5 0/0. Le Français consomme, par an, 1 kilogramme de *tabac* environ, c'est-à-dire qu'il absorbe dans ce temps 50 grammes de *nicotine*.

Féré<sup>(4)</sup> avait trouvé que, à très faible dose, le *tabac* sti-

(1) Duménil, *Les odeurs*, p. 26. *Thèse sciences*, Paris, 1843.

(2) E. Dixon (*Proceed. Roy. Soc. London*, 19 janvier 1911).

(3) Grossmann (*Journal de Pharmacie et de Chimie*, 1911).

(4) Féré (*Arch. de Neurologie*, 1901, p. 463).

mule la puissance musculaire; il favorise l'association des idées, d'après Claparède (1). Mais des études précises, faites par Weley (2), ont établi que la nicotine, en solution de son sel tartrique, produit sur les muscles un « effet typique » qui consiste en une diminution initiale de leur puissance, puis une augmentation suivie d'une chute graduelle. Somme toute, on observe une réduction de la contractilité des muscles qui, pour des doses à 0,8 0/00, se change en une abolition complète. L'accroissement de puissance n'est qu'un effet absolument éphémère.

Enfin la fumée du tabac, celles du papier à écrire, de la paille, du bois, contiennent toutes de l'oxyde de carbone (3) et du furfurol (4).

**194. Influences des poussières.** — L'atmosphère, surtout dans les villes industrielles, est toujours souillée de poussières et fumées qui s'y maintiennent grâce à la vapeur d'eau et forment un véritable brouillard. Ce sont, dans les usines à gaz et à charbon, des grains de charbon, d'oxyde de fer, de chaux, de silice, d'alumine, etc.

Certaines fumées sont corrosives, à cause des gaz chlorhydrique, fluorhydrique, sulfurique; d'autres sont tranchantes, coupantes, aidant par là à la pénétration des microbes dans l'organisme; et il en est de pathogènes donnant, par exemple, l'antracose, les pneumoconioses des mineurs, la maladie des garrister (silicose des poumons), celle des tailleurs de pierres meulières, etc.

A Paris, ces brouillards de l'industrie troublent l'atmosphère sur une épaisseur de 400 à 600 mètres, venant de la banlieue nord-est où abondent les usines, poussés par un vent généralement faible: 2 à 3 mètres (5); ils occasionnent les « odeurs de Paris » (§ 192) et ne se dissipent sous le vent

(1) Claparède et Isailowitch (*Comptes Rendus Biologie*, 1902<sup>1</sup> p. 758-760).

(2) Weley (*Proceed. Roy. Soc.*, vol. LXXXII, p. 333; 1910; série B); — T. Barry l'a aussi vérifié sur le cœur (*Lancet* du 19 nov. 1917).

(3) H. Molisch (*Anzeiger d. K. Akad. d. Wiss. in Wien*, t. XLVIII, p. 20; 1911).

(4) Le furfurol est une aldehyde  $C^5H^4O^2$  toxique; l'alcool méthylique, le vinaigre de bois, en contiennent.

(5) Enquête de Jaubert (*Revue gén. Sc.*, 1910, p. 842).

plus rapide (4 à 5 mètres) qui souffle de l'ouest-sud-ouest. L'abaissement de la pression barométrique, l'humidité et la température accroissent ces odeurs.

Les poussières sèches sont facilement combustibles dans l'air qui les tient en suspension ; il faut distinguer<sup>(1)</sup> entre les poussières de houille contenant *moins* de 18 0/0 de matières volatiles, et celles qui en contiennent de 19 à 30 0/0 : ces dernières explosent violemment, et d'autant plus vite que les grains sont petits. Quand les poussières ont une teneur minimum de 40 0/0 de cendres, et qu'elles sont humides, elles s'enflamment très difficilement. C'est ainsi que l'on verse, dans les galeries de mines, des poussières schisteuses arrosées, lesquelles suppriment tout danger d'explosion.

C'est à l'état particulière des poussières, qui leur donne une grande surface par rapport à leur masse, qu'il faut attribuer leur facile combustion. On en a fait la vérification dans les mines non grisouteuses, dans les raffineries et les meuneries (le 31 mai 1913, à la papeterie de Tourcoing).

Dans les circuits d'automobiles, on a constaté chez les chauffeurs des accidents oculaires, dus à ce que la poussière est formée de particules de *goudron*. En effet, tandis que les poussières ordinaires (calcaires ou siliceuses) déterminent simplement une légère inflammation des paupières, les poussières de goudron occasionnent des conjonctivites plus graves, à forme purulente<sup>(2)</sup>. Il en est de même chez les ouvriers qui travaillent aux *charbons agglomérés*, à cause de la poussière du *brai*<sup>(3)</sup>.

Le *dépoussiérage* est donc une nécessité. En mai 1912, s'est tenue à Londres une exposition des moyens de lutter contre les fumées industrielles (*Smoke abatement exhibition*). On a déjà préconisé, contre les poussières des galeries de mines, un aspirateur qui les amène sous un courant d'air comprimé

(1) Études faites à Frameries, à Lievin, à Altofts (Yorkshire), à Glesenkirchen (Allemagne), à Rossitz (Autriche), aux Instituts de sucrerie et de distillerie de Berlin, etc. (*Rev. gén. Sciences*, 1911, p. 477).

(2) Truc et Fleig (*Comptes Rendus Acad. Sc.*, septembre 1910).

(3) Congrès des maladies professionnelles de Bruxelles, septembre 1910.

capable de les expulser. En travaillant vingt jours par mois, et nettoyant 90 mètres de galeries par jour, un seul appareil suffit au bon entretien d'une galerie de 1.600 mètres (4). La précipitation par *champ électrique* a plus de partisans (2).

On a également utilisé, pour combattre les poussières des filatures, qui blessent les ouvriers (cardes, duvets, etc.), un aspirateur qui les amène sur un filtre où elles sont arrêtées. C'est ainsi que l'on peut nettoyer proprement les tambours de cardes et les doffers, sans gêner le travail (3).

**195. Influence des radiations. Actions solaires.** — Les radiations sont multiples; la *radiation calorifique* a été étudiée dans l'influence de la température (§173); elle est plus intense dans la partie *obscur*e du spectre qui précède le rouge et l'orangé. Par rapport à la partie *lumineuse* et *ultra-violette*, c'est une radiation *dégradée* au sens défini plus haut. Elle est *arrêtée* presque entièrement par une paroi de verre, une vitre, une serre. Seulement, la chaleur qui s'emmagasine dans une serre, dans un milieu clos par des vitres, n'est pas le fait de l'*opacité* de ces dernières; en effet, on éprouve la même élévation de température derrière des plaques de *sel gemme*, lequel est transparent à la chaleur (diathermane). Aussi Wood a-t-il démontré que l'air enfermé s'échauffe tout simplement parce qu'il ne circule pas (4).

La radiation calorifique est présente dans toutes les sources de lumière, à commencer par le *soleil*. Un rayonnement calorifique de 0°,0036 par centimètre carré et par heure produit une sensation de chaleur; s'il était 6,5 fois plus intense, soit de 0°,024, elle serait insupportable. La source idéale de lumière ne doit pas rayonner plus de 0°,0021, d'après Rubner (5). En comparant les divers *modes d'éclairage* on trouve que tous, sauf l'éclairage au pétrole, satisfont à cette condition (6).

La partie *lumineuse* du spectre, ou plus exactement

(1) *Genie civil* du 19 août 1911, p. 337.

(2) P. Hill (*Electrical World*, de New-York, 6 mai 1916).

(3) *Genie civil* du 12 avril 1911, p. 319.

(4) Wood (*Phil. Magaz.*, 1<sup>er</sup> sem. 1909, p. 319).

(5) Rubner (*Arch. f. hygiene*, 1895, t. XXIV, p. 193).

(6) V. Woege (*Journal für Gasbeleuchtung*, 1911, n° 13).

d'abord, la *lumière* tout entière, produit divers effets sur l'organisme, dont quelques-uns sont encore discutés. En particulier, il n'est pas absolument démontré que la radiation lumineuse élève le taux des échanges respiratoires<sup>(1)</sup>, augmentant la consommation d'oxygène.

Cependant la lumière est un *excitant* musculaire<sup>(2)</sup>, et il est incontestable que c'est un stimulant de la cellule. En effet elle favorise le développement du corps<sup>(3)</sup>, et en particulier de l'organe de la vision. Elle détermine la *pigmentation* de la peau, suivant une gamme très riche ; elle semble favoriser la multiplication des globules rouges.

Par contre, l'*obscurité* empêche le développement des organes ; elle atrophie celui de la vision ; elle *dépigmente* plus ou moins la peau<sup>(4)</sup> et abaisse le nombre des globules rouges<sup>(5)</sup>. Une sorte de vie ralentie s'empare des sujets mis dans un séjour obscur. C'est le cas des *familles pauvres* ; d'où la nécessité de lutter contre le *taudis*. La sensibilité générale est un peu émoussée, si bien que le retour à la lumière est un véritable « saisissement »<sup>(6)</sup> ; la puissance musculaire diminue<sup>(7)</sup> (cas des aveugles). Les radiations *colorées*, quand on les isole, ont chacune son action propre, d'après ce que l'on suppose ; car il n'est pas prouvé qu'elles modifient plus ou moins les échanges respiratoires<sup>(8)</sup>, ni la vitesse de développement des organismes<sup>(9)</sup>. Il n'est pas, non plus, tout à fait certain, que leur influence sur l'*idéation*, sur l'état psychique de l'homme, soit constante. On aurait

(1) Moleschott l'admettait, et aussi Fubini (*Arch. ital. Biol.*, 1891, t. XVI, p. 80). Contre parlent les travaux de Speck (*Arch. f. exp. Path. und Pharmak.*, 1880, t. XII, p. 1), Aducco, Loeb et Salomon (1907).

(2) D'Arsonval (*Comptes Rendus Biologie*, 1891, p. 318).

(3) W. Edwards, *Influence des agents physiques sur la vie*, 1824 ; De Humboldt ; Vicarelli (*Ann. d. Ostetr. e Ginecol.*, 1890).

(4) Armand Viré (*Comptes Rendus Acad. Sc.*, 14 mars 1904).

(5) Kronecker et Marti (*loc. cit.*).

(6) Voir un article dans *Nature* du 11 mai, t. LXXXVI, p. 349 ; 1911.

(7) Griesbach (*Pfl. Arch.*, 1899, t. LXXIV-LXXV) ; Féré, *Travail et plaisir*, p. 100 (*loc. cit.*).

(8) Selmi et Piacentini (*R. Ist. lomb. d. sc. e lett., Rendic.*, 1870, p. 57-63).

(9) E. Yung (*Comptes Rendus Acad. Sc.*, 1880, t. XCI, p. 440).

trouvé que, dans les ateliers photographiques, les ouvriers éclairés à la lumière *rouge* étaient très gais et bavards ; à la lumière violette, ils devenaient mélancoliques et apathiques, peu disposés à travailler.

La partie du spectre, formée du *violet et de l'ultra-violet*, exerce une action chimique ; elle est probablement le facteur important des phénomènes de pigmentation. Elle abonde dans la lumière électrique, et donne lieu à divers accidents, tels que l'*ophtalmie électrique des ouvriers* <sup>(1)</sup>, la cataracte <sup>(2)</sup> et l'érythème facial, aggravé parfois d'une congestion cérébrale. Les sources de lumières riches en ultra-violet déterminent ainsi de véritables coups de soleil, et la fatigue de l'œil <sup>(3)</sup>. Mais nous ne percevons pas ces *courtes radiations*.

196. Tout ce que nous venons de dire se retrouve condensé dans l'étude des *actions solaires*. L'astre du jour répand des flots de radiations, et aussi des particules électrisées. Il a des effets bienfaisants (microbicides), mais par ses rayons chimiques il peut déterminer des coups de soleil redoutables ; la chaleur n'y est presque pour rien <sup>(4)</sup>. En se servant d'écrans colorés, von Schrotter <sup>(5)</sup> vérifia que c'est bien la région allant du bleu à l'ultra-violet qui produit l'érythème cutané ; l'action est très sensible aux grandes altitudes.

Les nègres sont moins exposés à cet accident que les blancs, car leur pigment dégrade les rayons chimiques en rayons calorifiques ; « le nègre vit à l'abri de sa peau » (Ch.-Ed. Guillaume).

La lumière solaire, quand elle est douce, favorise l'*acuité visuelle*, la vision des couleurs, la vue nette des détails. Quand elle est intense, ce qui est le cas par exemple des contrées méditerranéennes, elle provoque des accidents

(1) Terrien (*Arch. d'Ophtalm.*, 1902, p. 692 ; 1908, p. 679).

(2) *Rev. Gén. Electricité* du 10 mars 1917.

(3) Lukiesh (*Electrical World*, 11 sept. 1915).

(4) Widmark (*Skand. Arch. f. Physiol.*, I, p. 264 ; IV, p. 281) ; Ch. Bouchard (*Comptes Rendus Biologie*, 1877).

(5) Mission du Ténériffe, de Jean Mascart (*loc. cit.*).

oculaires, et une légère déformation du globe de l'œil (astigmatisme inverse), rare dans les pays du Nord (1).

La *réflexion de la lumière* a, dans certaines conditions, des inconvénients pour le travail. Nous avons, par exemple, constaté que les surfaces mates, à coloration *jaune paille*, conviennent parfaitement à la vision des textes écrits, sans fatiguer les yeux; et qu'il y aurait intérêt à choisir des papiers légèrement jaunes pour les écoliers (J. Amar, *loc. cit.*).

Trotter vérifia, ensuite, que le papier doit offrir un éclat diffus, sans la réflexion métallique qui occasionne un véritable éblouissement (2). Et Bayliss démontre que, dans le jaune monochromatique, l'acuité visuelle est maximum (3).

Il fait, en outre, remarquer que les variations d'éclat sont pénibles et cause d'éblouissement. Cela se produit chez l'ouvrier obligé de fixer toujours le même point d'une machine localement éclairée. De même, les coiffeurs se plaignent de la fatigue oculaire déterminée par la vue du linge blanc. C'est aussi le cas des lingères, couturières, papetiers. On sait que les alpinistes ont fait semblable observation sur l'effet des neiges. La couleur jaunâtre est à recommander également pour les vêtements, dans certaines circonstances. Les moustiques les fuient (4), la radiation calorifique ne s'y absorbe que très peu, et ils se salissent moins que les blancs. Au point de vue professionnel, nous devons signaler qu'il faut une certaine éducation pour discerner très nettement les couleurs, et toutes leurs nuances. Il y a là des erreurs, dues à l'ignorance, et aussi aux changements d'éclats, comme aux défauts propres de la vision (5).

La chaleur solaire (6), dans les tropiques, élèverait la température de la peau humaine de 3 à 4°; elle tue le lapin et

(1) Jules Amar (*Journal de Physiologie*, 1908, p. 231-237).

(2) Trotter (*Brit. Med. Journ.*, 18 mars 1916).

(3) Bayliss (*Illuminating Engineer*, avril 1918).

(4) E. Shipley (*Brit. Med. Journ.*, 1915, p. 284).

(5) H. S. Jones (*The Observatory*, London, t. XL, décembre 1917). Consulter H. Bouasse, *Vision et reproduction des formes et des couleurs*, Paris, 1918.

(6) Hans Aron (*The Philippine Journal of science*, t. VI, avril 1911 et 1912); — O. Shaklee (*ibid.*, t. XII, janvier 1917).

le singe. On a remarqué que, dans ces circonstances, les nègres transpirent énormément pour lutter contre l'hyperthermie. Shaklée recommande, en vue de l'*acclimatement*, une alimentation modérée.

En résumé, par sa chaleur, son rayonnement chimique, un soleil intense est un véritable danger pour l'homme et les animaux.

Nous ne dirons rien ici des unités de lumière, de la photométrie, ni de l'éclairage des ateliers. Ce sujet est essentiellement du ressort de l'hygiène industrielle.

**197. Influence des champs électrique et magnétique.** — Le soleil, les orages, les machines électriques de l'industrie déversent dans l'atmosphère une quantité prodigieuse de particules électrisées appelées *ions*. L'ionisation de l'air est un phénomène permanent, dont l'homme n'éprouve aucune souffrance. Agit-elle pour augmenter sa force musculaire ou sa dépense d'énergie? Nous n'en savons rien; aucun fait positif, certain, n'est là pour en témoigner.

Le courant électrique excite les muscles et les nerfs, à la condition d'agir localement, par un choc; le courant galvanique, statique, semble accroître la puissance des muscles, effet qui persisterait pendant quelques jours (1). Mais l'action d'un milieu électrisé, après un violent orage ou dans les stations de radiotélégraphie, produit l'effet inverse, une légère dépression du système nerveux, de l'anémie, et une sorte d'apathie. Cela est-il dû à l'électrisation de l'air ou à la présence d'*ozone*? On a constaté que cet ozone, autour des dynamos, exerce une action microbicide, cellulicide(2), et probablement nerveuse(3). On est donc autorisé à dire que l'effet d'un champ électrique n'est pas favorable à l'organisme et peut, à la longue, compromettre la santé.

Les ouvriers agricoles sont exposés à la *foudre*. En l'absence de *paratonnerres*, la foudre atteint les sommets des maisons, des arbres, et chose curieuse elle frappe les arbres dans l'ordre de leur *résistance électrique* croissante: frêne, sapin,

(1) Capriati (*Riv. sper. di frenol. e med. leg.*, t. XXVII, p. 283; 1901).

(2) Candiotti (*Revue gén. des Sciences*, 1911, p. 224).

(3) *Elektrotech. Zeitsch.*, du 17 avril 1913.

pin, noyer, chêne, cerisier. Les coups de la foudre, instantanés ( $\frac{1}{1000}$  de seconde), sont terribles : deux ouvriers sont frappés en plein champ ; l'un meurt sur le coup, l'autre survit quelques heures ; leurs vêtements sont brûlés ; le crâne est brisé comme par un coup de massue. Souvent l'homme atteint est déplacé au loin.

Ce qui est grave, dans les actions de l'énergie électrique, ce sont donc les étincelles, les décharges. Prevost et Battelli (1) ont montré que le courant alternatif de basse tension arrête le cœur, mais la respiration persiste quelques minutes ; aux moyennes tensions, paralysie des deux fonctions ; à haute tension, le courant arrête la respiration, mais le cœur continue à battre. Dans ces conditions, on pourra tenter la *respiration artificielle*. Le courant alternatif est beaucoup plus dangereux que le courant continu.

Au contact des câbles, des fils de communication, les ouvriers subissent des commotions électriques. Ces commotions agissent (2) en arrêtant les battements du cœur et déterminant l'anémie des centres nerveux ; ou encore en paralysant les organes respiratoires, et dans ce cas elles produisent l'asphyxie ; la respiration artificielle s'impose donc ici surtout. Le triphasé détermine une « nécrobiose », l'altération des fibres nerveuses (3).

Une statistique de 55 accidents mortels, survenus par l'électricité dans les mines, a montré que 53 d'entre eux, soit 96 0/0, sont imputables au défaut d'isolement des câbles, au mauvais état des connexions de prise de terre des installations, mais aussi à l'insuffisance de ventilation dans les galeries. Et toutes ces causes sont évitables.

Les effets d'un *champ magnétique* sont obscurs et douteux. Schiff n'avait rien observé sur des muscles et des nerfs exposés à un champ magnétique, dans quelque direction

(1) Prevost et Battelli (*Journ. de Physiol.*, 1899, 1900). — G. Weiss (*Bull. Soc. intern. des élect.*, 3<sup>e</sup> série, t. I, n<sup>o</sup> 8, 1912) ; Gerbis (*Elektr. Zeitsch.*, juillet 1913).

(2) *Electrician*, 7 avril 1911. Sur les accidents d'électrocution, voir *Rev. Gén. Sc.*, avril 1913.

(3) G. Bolognesi (*H. Policlinico*, 1916, t. LXIX, p. 869).

que ce fût (1). Peterson et Kennely (2), opérant dans le laboratoire d'Edison avec des électro-aimants très puissants, ne reconnurent aucune action sur l'homme normal. Et pourtant un disque de cuivre tombant entre les pôles de l'électro ralentirait son mouvement comme s'il s'enfonçait dans la boue. Lord Lindsay et Cromwell Warley placent la tête d'un homme entre les pôles magnétiques et ne constatent rien. Cela est étonnant, s'écriait lord Kelvin : « Il doit y avoir, avec un magnétisme intense, une sensation que nous ne savons pas définir ni percevoir » (Voir § 195).

Toutefois, Féré (3), au moyen de l'ergographe, constata une augmentation de la force musculaire sur le bras dont on approche, à 1 mètre, un aimant ou un électro-aimant ; mais dans l'autre bras la force diminue. C'est une véritable oscillation. Enfin, Danilewski, Grandis (4) admettent qu'un champ magnétique peut exciter les muscles si ses *lignes de force* agissent *normalement* aux fibres. Ce phénomène est contesté, et en tout cas diversement interprété. Le *crescographe* (5) de Bose a permis de voir que les *ondes hertziennes* faibles accélèrent la croissance des plantes. C'est, croyons-nous, une réaction de sensibilité stimulée. Pourquoi n'en serait-il pas de même chez l'homme et les animaux ?

**198. Action d'un champ acoustique : sons, bruits.** — L'influence des *sons* sur le travail de l'homme se ramène à celle du *rythme* et de la cadence, déjà étudiés plus haut (§ 127). Il n'est pas douteux que nos muscles exercent leur activité d'une façon rythmique, et que tel est essentiellement le mode de l'action nerveuse.

La cadence des sons, l'harmonie, la musique ont des lois analogues dans la poésie. Et leur influence est de même nature. Rien de plus intéressant que de suivre le rôle de la mélodie, de la rime dans les formes nombreuses du travail

(1) Schiff (*Arch. sc. phys. et nat.*, 1888, 3<sup>e</sup> sér., I).

(2) Peterson et Kennely (*New-York med. Journ.*, 31 décembre 1892).

(3) Féré (*Comptes Rendus Biologie*, 1902, p. 388, 509).

(4) Grandis (*Arch. ital. Biol.*, 1902, t. XXXVII, p. 313).

(5) Le Crescographe est un *enregistreur* d'une extraordinaire délicatesse, qui amplifie le moindre mouvement (Voir § 204).

humain, à toute époque, dans toutes les civilisations et à tout âge <sup>(3)</sup>. Suivant que la cadence est *lente ou rapide*, elle retarde ou accélère la marche du soldat, les mouvements de l'ouvrier. Un son gai, redoublé, pressé, enlève une colonne militaire ; un son ralenti, espacé, assourdi, porte à la tristesse et à la somnolence. Tout un atelier s'arrête de travailler aux roulements du tambour d'un convoi funèbre. Chaque mode d'activité a, d'ailleurs, sa cadence propre. Il y a celle des scieurs de long, placés face à face et faisant des mouvements solidaires sur la scie, cela pendant un certain temps ; il y a la cadence des marteaux de forgerons qui permet à ceux-ci de battre alternativement sur l'enclume, sans se heurter, sans se gêner ; ils y gagnent, au contraire, en vitesse, et la quantité de travail s'accroît d'autant. On citerait encore le rythme du menuisier qui rabote, du boulanger (*geindre*) qui malaxe la pâte, de l'écrivain même, au sens manuel de ce mot, de l'orateur, etc. La chanson, la mélodie, un refrain ajoutent souvent au rythme de l'outil ; les paroles n'ont pas de signification intéressante, ni intelligible ; seule compte la *période*, c'est-à-dire, en définitive, le rythme auquel le travailleur suspend, en quelque sorte, le fil de son activité. Les chefs d'usines ou d'ateliers ont accoutumé de juger de l'intensité du travail de leurs ouvriers sur le son des outils... Quelle plus aimable allégorie que celle des murs de Jéricho tombant aux sonneries des trompettes, ou celle des murs de Thèbes s'élevant aux accents du musicien-poète Amphion ! Qui ne voit là l'effet du rythme sur l'entraînement de la main-d'œuvre?...

Les *intervalles* musicaux, suivant qu'ils sont *consonants* ou *dissonants*, stimulent ou dépriment le travail mesuré à l'ergographe. Les tonalités majeures sont plus avantageuses que les tonalités mineures ; c'est la sixte majeure (*la-fa-dièze*) qui

(3) Consultez le livre si curieux de Karl Bücher, *Arbeit und Rythmus*. Leipzig, 1909. L'auteur y étudie le rôle du rythme dans l'activité humaine, à travers les pays et les âges ; c'est une compilation de toutes les mélodies, poésies, morceaux de musique ayant pu servir ou servant au travail musculaire et intellectuel de l'homme.

donne le stimulus le plus fort<sup>(1)</sup>. Une excitation nerveuse agissant sur un muscle peut, dans certains cas, être renforcée par un son. Ce renforcement, c'est la *Bahnung* des Allemands ou *accélération nerveuse* <sup>(2)</sup>. L'appellation est due à Exner <sup>(3)</sup>. Quant au fait lui-même, nous l'attribuons à une *addition* d'excitations nerveuses, stimulantes ou déprimantes. D'où la variété des effets constatés.

Il résulte des observations concernant le rythme qu'il conduit à la justesse des mouvements, à la plus grande somme de travail dans un temps donné, à la meilleure utilisation des forces. Est-il besoin de dire que le *silence* des ouvriers, qui caractérise les ateliers anglais, est encore plus avantageux, sous ce rapport, que la mélodie chantée par tous; et que l'influence du rythme est la meilleure de toutes quand il résulte du seul mouvement des outils?

199. Tout autre est l'influence du *bruit*, des chocs (cas des téléphonistes), des trépidations. Aucun mode d'activité humaine ne peut se régler sur eux, à raison même de leur défaut de périodicité. A ce point de vue, le voisinage des moteurs à grande vitesse de rotation et mal équilibrés constitue un inconvénient; ils donnent lieu à des ébranlements, à des vibrations sensibles sur les édifices et les hommes. C'est, par exemple, le cas d'un moteur Diesel, dont on perçoit la trépidation à 100 mètres encore du point qu'il occupe <sup>(4)</sup>.

De même, les cahots des voitures sont des chocs très défavorables au travail (céphalée, vertiges). A plus forte raison, quand ces trépidations sont supportées par l'employé conducteur, pendant huit heures de suite. Il est de fait que tous ces employés s'en plaignent. Les secousses les fatiguent par la réaction constante qu'elles nécessitent de la part des muscles, par le bruit incessant qui les accompagne, par la station debout, et, ce qui est plus grave, par l'épuisement

(1) Féré et M<sup>me</sup> Jaell (*Comptes Rendus Biologie*, 1902, *passim*); Féré, *Travail et Plaisir* (*loc. cit.*).

(2) Yerkes (*Flüger's Arch.*, t. CVII, p. 207; 1905).

(3) S. Exner (*Pfl. Arch.*, 1882, t. XXVIII, p. 487).

(4) Prince Galitzine (*Comptes Rendus Acad. Sc.*, 1910, 1<sup>er</sup> sem., p. 901 et 1041); E. Hall (*Electr. World*, 1915, t. LXVI, p. 1356).

nerveux qu'elles déterminent. La trépidation est un choc que l'élasticité du corps humain n'amortit pas complètement; elle imprime, par sa fréquence, des oscillations au corps, comme le passage des autobus sur la chaussée fait vibrer les édifices. L'amplitude de ces oscillations, accusée par un *sismographe*, est assez grande pour qu'il y ait lieu de s'en soucier tant au point de vue de la santé que de la sécurité. Dans les usines il y aurait à se préoccuper d'amortir les trépidations des moteurs, leur bruit (en aviation). Les chocs du téléphone produisent une nécrose<sup>(1)</sup>.

Bruits, chocs, trépidations doivent être diminués en raison de leur influence déprimante sur le travail, malgré l'atténuation que l'habitude du métier y apporte. « Les maréchaux, meuniers, armuriers, ne sauraient demeurer au bruit qui les frappe, écrivait Montaigne, s'il les perçait comme nous. »

**200. Influence des outils.** — Dans des conditions déterminées de vitesse et d'effort, la puissance utile dépend, évidemment, de la *perfection* des outils; il faut entendre, par là, les qualités de résistance, de trempe, la forme même de l'instrument (truelle, lime, ciseaux, scie, marteau). Ce qui, pendant longtemps, fit la supériorité de l'ouvrier anglais, c'était l'état parfait de son outillage (Dupin, 1825).

Mais il est aussi un élément quantitatif de haute importance en matière d'instrumentation. Pour que l'homme effectue des mouvements rapides et produise un travail maximum, il faut que ses outils ne dépassent pas un certain poids; la recherche de ce poids optimum est d'ordre expérimental; il varie d'un mode de travail à un autre et suivant les circonstances professionnelles, l'âge et le type du sujet.

Dans une acception plus large du mot, *l'outillage* est l'ensemble des éléments d'une installation d'atelier, d'usine, de chantier; il est nécessaire que cette installation soit rationnelle et ne gêne pas la vitesse des mouvements, n'en occasionne point qui ne soient strictement utiles à l'ouvrage, n'oblige pas à des interruptions autres que celles des intervalles de repos; il faut qu'elle réduise au minimum les efforts

(1) Capart (*Bull. soc. belge Otologie, etc., 1911*).

utiles et supprime les contractions stériles des muscles. Ainsi, le transport de sable dans une brouette à une seule roue entraîne des balancements et oscillations qui déterminent une fatigue rapide ; on choisira donc une brouette à deux roues.

De même on groupera les commandes d'une machine, on équilibrera les pièces à déplacer, etc. (1).

L'art doit intervenir pour répondre, au fur et à mesure, aux besoins de l'organisation scientifique du travail professionnel, et substituer des méthodes rigoureuses aux tâtonnements de l'empirisme. Le *machinisme* se perfectionne tous les jours, et la *Division du travail* spécialise de plus en plus l'ouvrier et l'outil. C'est ce que Babbage, dans son *Traité de l'Économie des machines et des manufactures*, mit nettement en évidence (trad. franç. de Ed. Biot, Paris, 1837).

Imbu apparemment de ces idées, un éminent ingénieur américain, Frédéric Taylor (2), organisa, sur les principes ci-dessus, des usines métallurgiques où, grâce à un effort patient d'un quart de siècle, il opéra une véritable révolution (invention des *acières à coupe rapide*, outils à tranchants de formes variées, etc.). Frank Gilbreth (3) appliqua ces mêmes principes au travail de la maçonnerie, avec beaucoup de succès, etc. De tels exemples attestent que le travail humain est chose extrêmement complexe, que des facteurs nombreux, internes à l'ouvrier, ou externes, y retentissent ; que leur étude ne saurait être abandonnée au hasard de l'observation. Elle doit résulter de la collaboration méthodique des laboratoires scientifiques et des ressources de l'industrie.

(1) Dowd (*Engineering Magaz.*, juin 1916) ; — G.-H. Shephard (*Industrial Management*, janvier 1917).

(2) Frédéric Winslow Taylor, *Principes d'organisation scientifique des usines*, trad. Jean Royer, préface de H. Le Chatelier, 1912, Dunod et Pinat ; et *Publication de la Revue de métallurgie*, 1907.

(3) Frank B. Gilbreth, *Motion Study*, London, 1911 (*loc. cit.*).



# LIVRE V

## TECHNIQUE EXPÉRIMENTALE

---

### CHAPITRE I

#### LES MESURES : INSTRUMENTS

201. **Mesures et erreurs.** — Sous le nom de *Technique expérimentale*, nous allons exposer les éléments de l'art des *mesures*, et décrire les instruments que nous avons indiqués. La technique a l'*exactitude* pour règle invariable, et elle est ainsi la source de la vérité. Le temps consacré à améliorer sa technique est mieux employé qu'il ne le serait à poursuivre un fait nouveau, car le degré de confiance est en proportion du degré de certitude.

Une mesure n'est jamais absolument correcte ; il s'y glisse toujours une *erreur*, si faible soit-elle, et quelque habileté qu'on y apporte, quelque parfaits que soient les instruments. L'art de mesurer consiste, précisément, à savoir atteindre la limite extrême d'*exactitude expérimentale*, ou la plus petite erreur.

On désigne du nom d'*erreur absolue* l'écart de la valeur trouvée à la valeur réelle. Soit, par exemple, à déterminer le poids d'un homme de 65 kilogrammes. Si la balance accuse 64<sup>kg</sup>,900, c'est une erreur absolue de 0<sup>kg</sup>,100 *par défaut*. Si elle donne 65<sup>kg</sup>,100, c'est une erreur absolue de 0<sup>kg</sup>,100, mais *par excès*. La réduction des erreurs absolues dépend du degré de perfection des instruments.

Le rapport de l'erreur absolue à la grandeur totale à mesurer se dit *erreur relative*. Dans l'exemple précédent, c'est  $\frac{0,100}{65} = \frac{1}{650}$ . On voit que l'erreur relative diminue à mesure

que la quantité totale à mesurer augmente. Pour un poids de 130 kilogrammes, on aurait :

$$\frac{0,100}{130} = \frac{1}{1.300}.$$

Dans les expériences, on doit se guider d'après le but poursuivi pour assigner à l'erreur relative une limite tolérable. Ainsi, récoltant 100 litres de gaz, tandis que le compteur marque 99<sup>l</sup>,50, l'erreur est acceptable; elle est de  $\frac{0,50}{100} = \frac{1}{200}$  ou  $\frac{5}{1000}$ .

Mais si on avait lu 9<sup>l</sup>,50 pour 10 litres récoltés, l'erreur relative  $\frac{0,50}{10} = \frac{1}{20}$  serait inacceptable. De même, en pesant 50 grammes de sucre avec une balance sensible au centigramme, la pesée sera bonne, car l'erreur possible n'est que de :

$$\frac{1}{100 \times 50} = \frac{1}{5.000}.$$

L'imperfection d'un instrument peut donner lieu à un autre genre d'erreurs dites *systématiques*. C'est le cas d'une pesée faite au moyen de poids non *étalonnés*, ou trop faibles ou trop forts; d'une longueur mesurée avec un mètre raccourci par l'usure de ses extrémités, etc. Il faut alors changer d'instrument.

Enfin, au cours d'une opération, il peut se produire une *erreur dite fortuite*, parce qu'insoupçonnée, imprévue, (par exemple : une variation de température, un mouvement de l'homme qui respire à travers un compteur, etc.; le débit gazeux est modifié, et l'on ne sait pas, généralement, l'importance de la *cause*). Autre exemple : on effectue la pesée de 100 grammes d'eau; il y aura toujours une erreur fortuite due à l'évaporation.

Quelques précautions que l'on prenne, une *seule* mesure est insuffisante; il en faut au moins deux concordantes dont on prendra la moyenne.

202. En réalité la concordance de plusieurs déterminations n'est pas rigoureuse; entre elles il y aura des *écarts*; si on établit la

moyenne arithmétique des  $n$  valeurs trouvées  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ , en écrivant :

$$a_m = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n}{n}$$

chacune de ces valeurs différera de la moyenne  $a_m$  en plus ou en moins. On aura  $n$  écarts, représentés par  $\delta$ . Si les écarts sont petits, et le nombre  $n$  d'observations assez grand, la moyenne  $a_m$  représentera sensiblement la quantité cherchée. Mais, en vue d'une plus grande précision, on appliquera le *Calcul des probabilités* (1); on fera la somme  $S$  des carrés de tous ces écarts, somme évidemment positive, et on aura l'*erreur moyenne*  $e$ ; c'est :

$$e = \pm \sqrt{\frac{S}{n(n-1)}}$$

On démontre que l'*erreur probable* est environ les  $\frac{2}{3}$  de  $e$ . Par conséquent la valeur cherchée  $a$  sera :

$$a = a_m \pm \frac{2}{3} e,$$

$a_m$  étant la moyenne arithmétique. En définitive, on a cherché à faire que la somme des carrés des écarts, ou  $S$  soit la plus petite possible. De là le nom de *loi des moindres carrés* donnée à la méthode. Dans d'autres cas, on a besoin de tracer la courbe des écarts pour vérifier la *Loi* dite de *Gauss*.

Le diagramme représentant la série des données statistiques es la *courbe de fréquence*; on le décompose en diagrammes typiques dont la *courbe des erreurs* de *Gauss*.

Dans le *Calcul des Probabilités*, les molécules des gaz, les cellules qui entrent en combustion, ou les êtres humains que l'on considère en *Démographie* (natalité, mortalité, etc.) ne sont pas traités isolément, mais collectivement; ils font partie d'un *état statistique* régi par des causes multiples ou insoupçonnées qui produisent les écarts, causes plus aisément appelées *Hasard*. C'est pour une cause ignorée, ou par impossibilité, qu'on ne peut connaître la température d'une cellule vivante; celle du *corps* est une *température statistique*.

(1) E. Carvallo, *le Calcul des probabilités et ses applications*, 1912, p. 118 (Gauthier-Villars, Paris). Cet ouvrage se distingue par la clarté et la simplicité.

Il est bon d'effectuer les calculs sans attendre la fin d'une série d'expériences, de manière à s'assurer, avant d'aller plus loin, qu'il n'y a pas eu d'erreur. On notera la *température*, la *pression atmosphérique* du moment, la date et le lieu. Si on expérimente sur l'homme, on établira son état civil : sexe, nom, profession, âge, taille, etc.

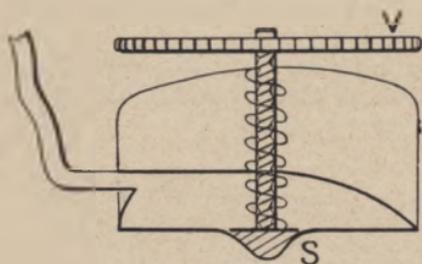


FIG. 152. — Cardiographe de Marey.

203. **Méthode graphique.** — Pour diminuer les causes d'erreur, on a, d'une part, perfectionné les instruments, dont on doit vérifier l'exactitude avant toute expérience; et

d'autre part, on s'est ingénié à leur faire *inscrire* les indications que l'observateur, autrefois, se contentait de *lire*. Le rôle des *sens* de l'observateur est ainsi éliminé, et on en évite tous les inconvénients (équation personnelle). La méthode d'enregistrement ou d'inscription *automatique* porte le nom de *méthode graphique*; elle fournit des tracés de *mouvement* (voir § 5). C'est souvent, comme dans le *tambour de Marey*, une membrane élastique, caoutchouc ou métal, qui transmet à un *style* les déformations du poulx, du cœur, les respirations, etc. : d'où les *sphygmographes*, *cardiographes*, *pneumographes*, etc.

Le *cardiographe de Marey* (fig. 152), qui décèle la pulsation du cœur, est un tambour enfermé dans une cloche, et dont la membrane présente une saillie en ivoire S, et se trouve plus ou moins tendue, grâce à un ressort à boudin réglé par la vis V. On appuie la cloche contre la poitrine de manière que le bouton S se place sur le cœur, vers le cinquième espace intercostal, et on transmet les pressions de l'air à un tambour récepteur.

Le *pneumographe* traduit les ampliatiions de la poitrine. Le modèle de Laulanié comprend un tambour T soudé à une pièce métallique qui vient s'appliquer sur la poitrine. Un ruban inextensible R fait le tour de celle-ci et se fixe sur la

pièce en A, et sur les dents B d'une planche articulée P. Cette planche reçoit le bouton de la membrane et la tend convenablement grâce au levier L et au lien élastique I. Il est aisé de comprendre qu'à l'inspiration, la planche est pressée en B et tend à basculer en tirant sur la membrane; de là une aspiration de l'air qui se transmet au tambour récepteur. Le contraire a lieu à l'expiration (fig. 153). On

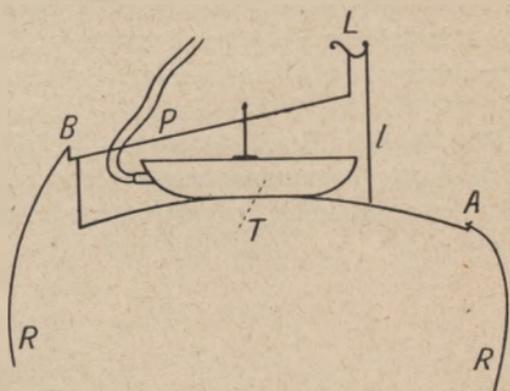


FIG. 153. — Pneumographe.

emploie aussi des *pneumographes doubles*. La fig. 138 montre un enregistrement pneumographique pendant le travail.

Le *sphygmographe de Marey* accuse la pulsation ou le *pouls*, c'est-à-dire la pression de l'onde sanguine dans l'artère radiale; plus

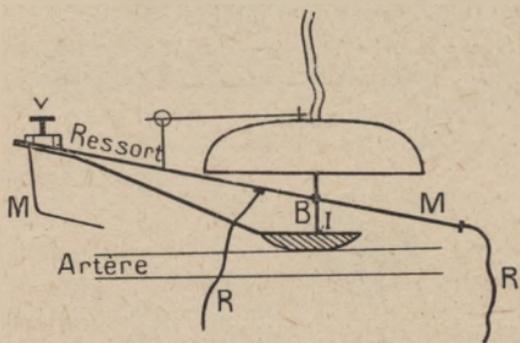


FIG. 154. — Sphygmographe à transmission de Marey.

exactement il fournit la courbe de cette pression. A cet effet, un ressort à pression appuie contre l'artère une petite plaque d'ivoire I et la déprime légèrement; les oscillations de la plaque se trans-

mettent à une pièce basculante B qui actionne la membrane d'un tambour. Ce sphygmographe, dit *à transmission*, se fixe sur le bras au moyen de rubans R attachés à la monture M. On règle la pression du ressort par la vis V (fig. 154).

Les explorateurs des mouvements physiologiques sont en

nombre infini, et il est toujours possible d'approprier un tambour de Marey au but que l'on poursuit. On peut ainsi transmettre le gonflement, le raccourcissement d'un *muscle*, et faire, en général, des études de *myographie*. Il n'y a donc pas à insister sur des applications qui dépendent de l'ingéniosité de chacun dans les circonstances les plus variées.

204. Quant à l'enregistrement, il s'obtient en amenant le style du tambour récepteur au contact d'un papier *enfumé*, recouvrant un cylindre qui tourne à la vitesse voulue.

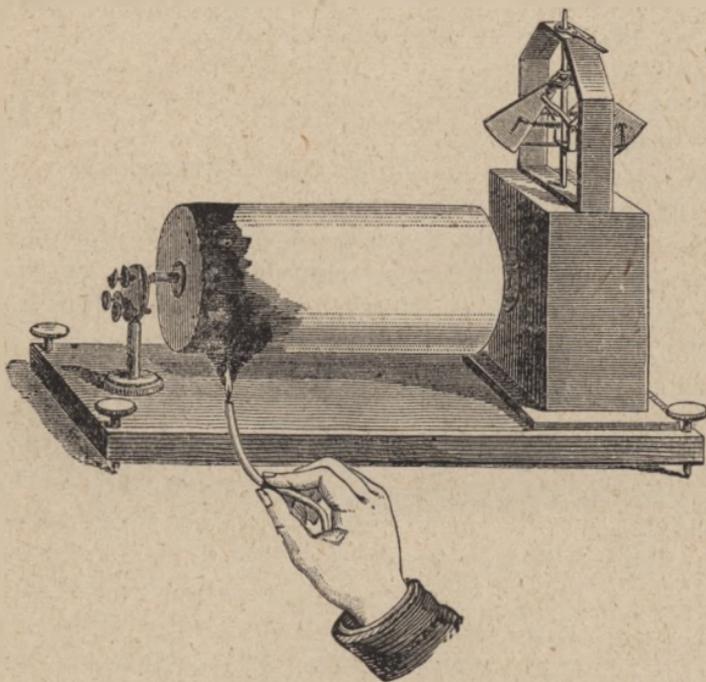


FIG. 155. — Manière de noircir un cylindre enregistreur.

Le frottement du style sur le papier doit être négligeable ; c'est ce que réalisent des styles de bambou ou en paille terminés par une pointe en plume d'oie ; et, d'autre part <sup>(1)</sup>, le papier glacé du commerce faiblement enfumé, soit un enduit très peu épais. Le noir de pétrole convient le mieux.

(<sup>1</sup>) Ch. Fleis (*Phys. Zeitsch.*, t. XII, p. 394 ; 1911).

Mais on emploiera aussi bien l'essence de térébenthine ou plus simplement, un morceau de rat de cave, comme le montre la figure (fig. 155).

Le dépôt a une coloration brune ou marron s'il est convenable. Du reste, sur la plupart des tambours à levier, une virole mobile permet d'appuyer peu à peu le style contre le papier délicatement. On monte les organes récepteurs devant le cylindre en les fixant à des supports. Il est commode d'avoir plusieurs supports sur un *chariot automoteur*, capable de les déplacer d'un bout à l'autre du cylindre

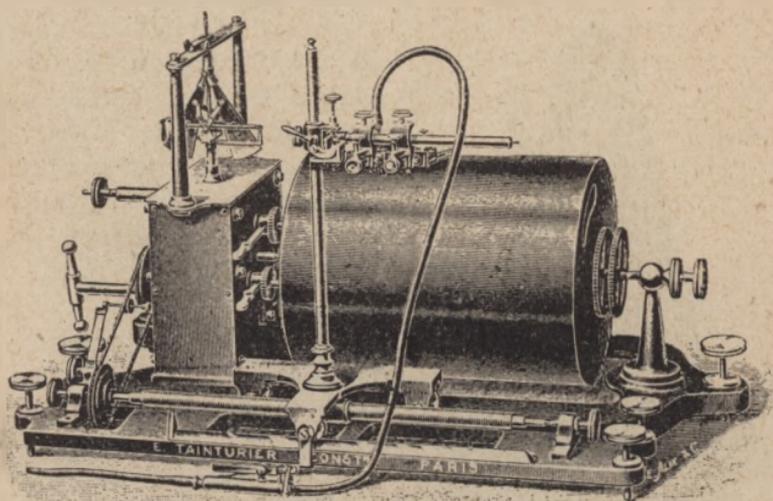


FIG. 156. — Chariot automoteur sur lequel le support se déplace parallèlement au cylindre.

(fig. 156). Les tracés pourront ainsi se suivre sous la forme hélicoïdale et couvrir toute la feuille. On règle d'ailleurs la vitesse de rotation en changeant d'axe : il y en a généralement trois, c'est-à-dire trois changements de vitesse ; sur des modèles plus récents, les changements de vitesse sont possibles avec un seul et même axe. La régularité de la rotation est assurée par un *régulateur* de Foucault, à ailettes (voir figures précédentes).

Les *graphiques* une fois obtenus, on les *fixe*, ou on les *colle* en trempant la feuille, coupée suivant une génératrice du

cylindre, dans un bain fixateur. Le bain se compose d'une solution filtrée de gomme laque dans l'alcool à 36°, et d'un peu de térébenthine de Venise. On avait, au préalable, inscrit sur la feuille toutes indications utiles (date, température, etc., § 202), et tout cela demeurera presque indélébile sur la feuille collée et séchée.

La méthode graphique révèle, par sa sensibilité, des détails qui échappent à nos sens; en effet, on peut amplifier les mouvements grâce à des leviers recevant très près de leur articulation les oscillations de la membrane (§ 5).

En combinant deux leviers, et multipliant chacun par 100, Sir Jagadis Bose, biologiste hindou, obtint une multiplication de 10.000, et plus tard de 1 million. Son *Crescographe* sert surtout à mesurer la croissance des plantes (1). D'où son nom.

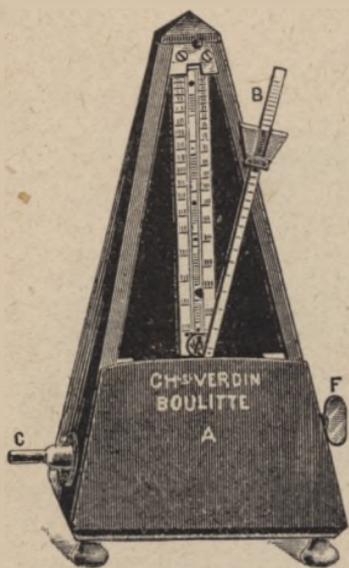


FIG. 157. — Metronome.

205. **Mesure du temps.** — L'unité de temps est la *seconde*. Il est rare, dans les phénomènes que nous étudions, d'avoir à évaluer de petites fractions de secondes. Cependant, il s'agirait de *marcher* à 100 ou 150 pas par minute, d'actionner les touches d'un piano, d'une machine à écrire, etc., on

aurait à connaître la *durée* de chaque mouvement, soit  $\frac{1}{2}$  à  $\frac{1}{5}$  de seconde. Il suffira, dans la plupart des cas, d'employer un *metronome à musique* : il donnera la *cadence* du travail, la réglera invariablement, et permettra de savoir la durée

(1) P. Geddes, *Life and Work of Sir Jagadis Chunder Bose*; London: 1920; — Bose, *Life Movements in plants*; Londres, 1920; et (*Biologie*, 10 juillet 1920).

d'un acte mécanique isolé. Généralement, le métronome marque à peine le quart de seconde, faisant de 40 à 208 battements par minute (fig. 157). Les diverses cadences sont obtenues en déplaçant la *masselotte* B sur la tige pendulaire, et l'arrêtant à la division voulue (voir § 28).

Le métronome se remonte et marche environ trois quarts d'heure; mais on peut l'*entretenir* électriquement.

Pour inscrire le temps, sur un cylindre enregistreur, en même temps que les graphiques du mouvement, on se servira de *chronographes*. Dans le chronographe de Jaquet, l'échappement a lieu toutes les secondes ou cinquièmes de seconde et déplace le style inscripteur, presque toujours en aluminium (fig. 158). Il porte deux cadrans dont un marque les secondes, et l'autre les minutes. Il se monte sur un support comme les tambours de Marey. Son style trace des encoches dont le nombre sera celui des secondes ou cinquièmes

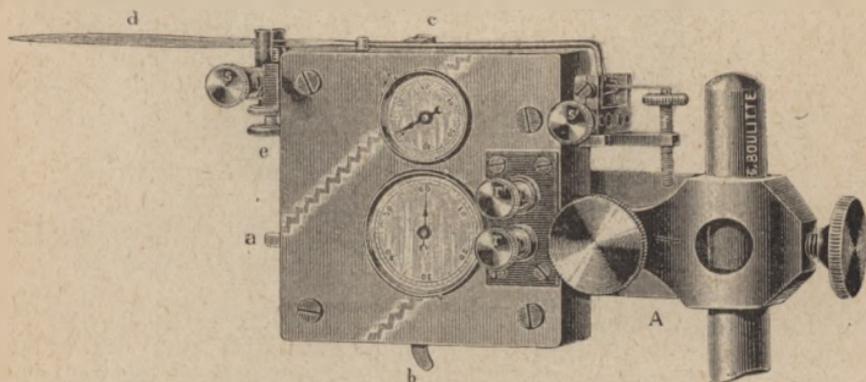


FIG. 158. — Chronographe de Jaquet.

de secondes que le phénomène a duré. C'est, en définitive, une montre à ancre et à levier.

Pour mesurer le temps, sans l'enregistrer, on emploie les montres « trotteuses », les *chronomètres* et *chronoscopes* marquant secondes et minutes. On les met en marche ou on les arrête en poussant un bouton dans un sens ou dans le sens opposé, soit encore en pressant une ou deux fois sur le bouton de commande (fig. 159). L'erreur est de  $0^{\text{sec}},4$ .

Quand le phénomène doit durer plus de *dix minutes*, on se servira d'*horloges à échappement sonore* qui produisent un bruit net à la fin de chaque minute. On pourra même, avec quelque précaution, se contenter d'une montre ordinaire

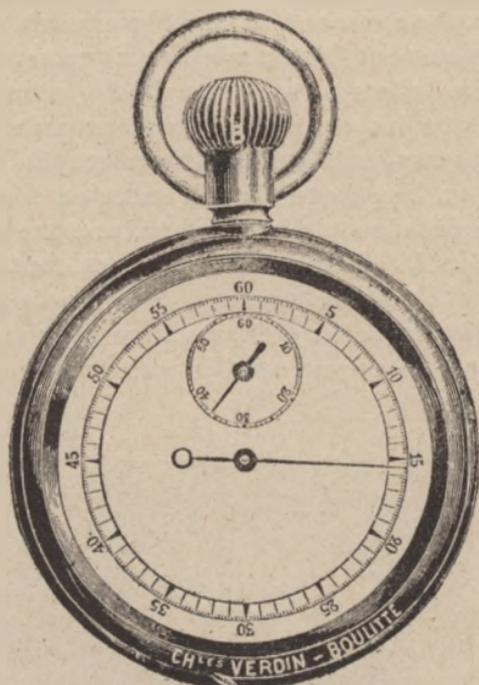


FIG. 159. — Montre-Chronomètre.

exacte. L'erreur, ici, atteint au plus deux à trois secondes par heure, soit une erreur relative moyenne de  $\frac{1}{1.500}$ . Par exemple, un homme travaillant avec ardeur éliminerait 1.500 litres de gaz; l'erreur relative serait de 1 litre par heure.

Dans les expériences sur la vitesse de réaction des *sens*, je combine souvent l'inscription du temps et celle des signaux. Le métronome convient très bien à ce but; il est entretenu électriquement, et son balancier porte un cavalier à deux branches, lesquelles viennent, alternativement, plonger dans un godet à mercure et fermer le circuit du signal (Voir l'*Orientation professionnelle*, p. 43).

206. Les expériences concernant la mesure de phénomènes très rapides, surtout les phénomènes nerveux, ceux de nature psychique, et les phénomènes de choc, tels que les coups de marteau, obligent à l'emploi de chronographes donnant le  $\frac{1}{100}$  et même le  $\frac{1}{1.000}$  de seconde. On se sert alors d'électro-diapasons dont

on inscrira les vibrations. Nous n'aurons pas à en faire usage fréquemment. Les vibrations du diapason sont recueillies directement, ou par l'intermédiaire de signaux électriques dont le plus connu est le signal de Marcel Deprez. D'une part, les deux branches du diapason comprennent entre elles un électro-aimant qu'entretient une pile P

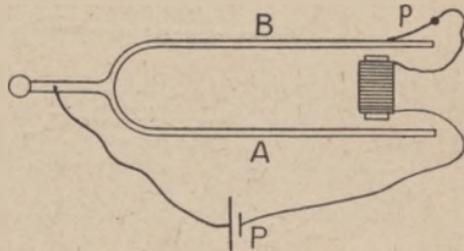


FIG. 160. — Électro-diapason.

(fig. 160). Le circuit étant fermé, la branche B est attirée par le fer de la bobine et quitte le contact d'une pointe de platine *p*; alors le circuit s'ouvre, et le diapason revient en vibrant prendre de nouveau contact avec la pointe.

On entretiendrait ainsi l'état vibratoire d'un diapason, et chacune de ses branches, si elle était munie d'un style, une soie de sanglier, par exemple, donnerait plusieurs encoches sur la feuille de papier enfumé, 4.000 par seconde si l'on a 2.000 vibrations doubles

Mais on peut, d'autre part, introduire le signal de Deprez dans le circuit de la pile. Ce signal est formé d'un électro-aimant très petit E (fig. 161), qui reçoit le courant de la pile du diapason et attire une lame de fer doux D portant le style S; cette lame oscille donc autour de son axe à chaque vibration du diapason, et ne reprend sa position initiale que grâce à un petit ressort spiral R; c'est le dispositif de notre *Psychographe*, par ex. Le signal, monté sur un pied-support, se place contre le cylindre enregistreur, ce qui permet de transmettre à longue distance l'inscription du temps (voir fig. 146).

L'oscillographe est encore plus exact, et donne le  $\frac{1}{10.000}$  de seconde.

Ainsi qu'il a été dit, un chronographe de Jaquet donnant le  $\frac{1}{5}$  de seconde est bien suffisant pour la pratique; l'erreur probable y est rarement de  $\frac{1}{2000}$ .

Lorsqu'on doit lire le temps sur une montre, il faut réduire l'erreur en augmentant la durée du phénomène; on notera, par exemple, plusieurs mouvements semblables  $n$  d'un homme, dans un temps  $t$  en demi-secondes; la durée de l'un deux sera  $\frac{t}{n}$ , avec une erreur probable de  $\pm \frac{1}{n}$ .

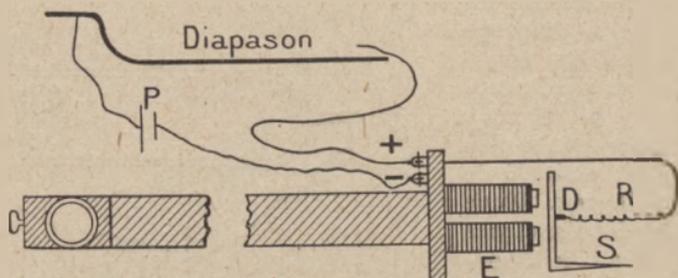


FIG. 161. — Enregistrement du temps par un électro-diapason.

207. **Mesure de la vitesse.** — La vitesse exprime, comme nous l'avons déjà dit, une *intensité*. Dans un mouvement *uniforme*, c'est le rapport de la distance au temps, le parcours effectué en une *seconde*.

Quand un mouvement est périodique, tel que dans chaque période il soit uniforme, la distance divisée par la durée de la période donne la vitesse moyenne. La marche de l'homme, obéissant à une *cadence* déterminée, est dans ce cas. La vitesse moyenne de la marche est donc facile à connaître. Plus souvent, on l'exprime en *pas*, la grandeur du pas étant évaluée en centimètres.

Pour la bicyclette, on se contente de compter le nombre de coups de pédale: chaque fois, en effet, que la pédale a fait un tour complet, la machine a progressé de tout son *développement*. On emploie aussi des *montres-tachymètres* (modèle Château) dont le principe est que le boîtier d'une montre est mis en rotation par une roue du véhicule; dans ces conditions, la vitesse du boîtier est égale et opposée à celle de l'aiguille de la montre.

On possède même des « entraîneurs acoustiques » ana-

logues au métronome, qui se placent sur le guidon, et qui battent la mesure du coup de pédale, réglant ainsi la vitesse. Un ressort heurtant la roue arrière et produisant un son servirait au même but (Voir § 231).

On peut enfin enregistrer électriquement les tours de la roue motrice, surtout si le bicycle est monté sur bâti fixe comme dans certaines expériences (§ 231).

Marey<sup>(1)</sup> imagina diverses dispositions pour compter le nombre de pas et mesurer leur longueur dans la locomotion humaine. Reprenant l'ancien compteur de pas ou *podomètre*, lequel s'articulait au-dessous du genou et indiquait le parcours grâce à une série de pignons et de roues actionnant une aiguille, il se servit de la transmission par l'air. La description de cet *hodographe* (du grec *odo*;, distance) n'est pas utile.

Marey fit aussi usage d'une piste avec relais électriques pour avoir un tracé de la marche dont il a pu déduire la vitesse en fonction de la cadence<sup>(2)</sup>.

L'industrie fait un grand emploi des compteurs de tours des machines, des *tacheomètres* pour bicyclettes et automobiles.

Il est des compteurs qui, dans les ateliers de tissage, fournissent la quantité de trame déroulée et insérée par la navette du tisserand, d'une lisière à l'autre, ou la quantité de « duites ».

Le *compte-duites* se fixe au moyen d'une équerre au bâti du métier, et à une hauteur telle qu'il soit facile à l'ouvrier de lire les chiffres. Celui-ci est donc renseigné sur la quantité de travail produite.

Dans le travail mécanique du bois, on se sert de compteurs capables de totaliser les longueurs de planches rabotées ou sciées (fig. 162).

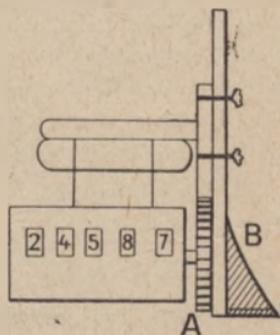


FIG. 162. — Totalisateur de planches.

(1) Marey, *la Méthode graphique*, p. 183 ; 1878.

(2) Marey, in *Traité de Physique biologique* Marey, D'Arsonval et Gariel, t. 1, p. 187, 1901 (chez Masson).

Le totalisateur de planches est formé d'une roue moletée A, qui est actionnée lorsque les planches sont déplacées. Un support B fixe le compteur au bâti de la machine. Les indications sont en mètres.

208. **Anémomètres.** — La vitesse linéaire des gaz est donnée par les *anémomètres*, surtout quand il s'agit d'évaluer la « force » d'un courant. C'est ainsi que, dans l'industrie des mines, on doit connaître à tout moment la quantité d'air envoyée dans la mine. Si l'on fait le relevé de la vitesse dans une galerie, on prendra la valeur moyenne, car cette vitesse varie aux divers points de la section : elle est généralement plus grande au centre qu'à la paroi.

Aux vitesses de 0<sup>m</sup>,50 à 10 mètres par seconde, il suffira

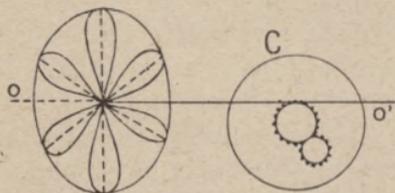


FIG. 163. — Anémomètre de Combes.

de l'anémomètre classique de Combes (*fig. 163*) ; il est formé d'ailes planes montées à 30° d'inclinaison sur un axe très délié et tournant dans des chapes en agate. Le moulinet, exposé au vent de manière que la direction de la vitesse

de celui-ci soit parallèle à l'axe  $oo'$ , tourne plus ou moins vite. L'axe communique son mouvement à des engrenages qui font avancer une aiguille sur un cadran C gradué en tours. On comptera N tours, par exemple, pour le temps  $t$ . On a pour la vitesse :

$$V = a + bN;$$

$a$  est un coefficient instrumental,  $b$  dépend de la densité de l'air. Il faut donc tarer l'appareil au moyen de vitesses connues, dans un air au repos. Si on lui imprime les vitesses  $V_1$  et  $V_2$  et qu'il donne les nombres de tours  $N_1$  et  $N_2$  dans le même temps, on écrira :

$$V_1 = a + bN_1 \quad \text{et} \quad V_2 = a + bN_2$$

De là on déduit  $a$  et  $b$ .

Le nombre d'anémomètres est considérable ; modèles de

Casartelli, Biram, Robinson, Rosenmüller, Richard, etc. Le plus récent anémomètre de Lea-Biram<sup>(1)</sup> comprend une roue à palettes  $p$  commandant une aiguille qui se déplace sur un cadran  $c$ ; un système d'engrenages réduit la vitesse de rotation de l'aiguille pour qu'elle ne fasse pas plus de 20 tours par minute, quand la vitesse du vent atteint 10 mètres (fig. 164).

On peut compter à distance un nombre  $N$  de tours en  $t$  secondes. La vitesse en mètres est donnée par la relation :

$$V = \frac{30N}{t}$$

Dans le modèle de Robinson, le moulinet est formé de coupes hémisphériques, au lieu de palettes; mais le poids de l'appareil est trop grand, il s'y produit des frottements et les indications manquent d'exactitude, surtout au-delà de  $V = 30$  mètres<sup>(2)</sup>.

Les anémomètres Richard ont, comme dans le type Biram, un moulinet très léger, formé d'ailettes en aluminium; ils indiquent la vitesse du vent en mètres.

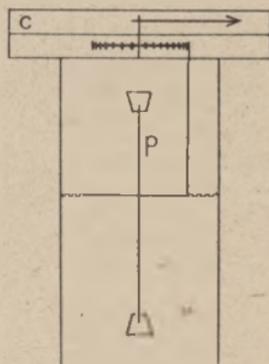


FIG. 164. — Anémomètre de Léa-Biram.

### 209. Éléments statiques de la machine humaine : taille.

— On détermine la taille (§ 79) par emploi des méthodes d'Alphonse Bertillon<sup>(3)</sup>.

Pour la *taille entière*, le sujet est placé debout et pieds nus contre un mur vertical; les talons sont réunis; il maintient sa tête droite et regarde en avant. Une règle de 2 mètres est appliquée verticalement sur le mur, depuis le sol; on appuie contre elle une équerre que l'on fera glisser jusqu'au premier contact avec le sommet de la tête. La lecture se fait sur la règle. Il est bon d'effectuer deux lectures. Surtout il est essentiel de veiller à ce que le sujet ne prenne pas des

(1) *Engineering* du 20 octobre 1911.

(2) C.-E. Brazier (*Comptes Rendus Ac. Sc.*, 8 mars 1920).

(3) Consulter : *Anthropologie métrique* de Bertillon et Chervin, Paris, 1909. Les clichés des trois figures suivantes, nous les devons à l'obligeance de Bertillon. Cet anthropologiste éminent est mort en 1918.

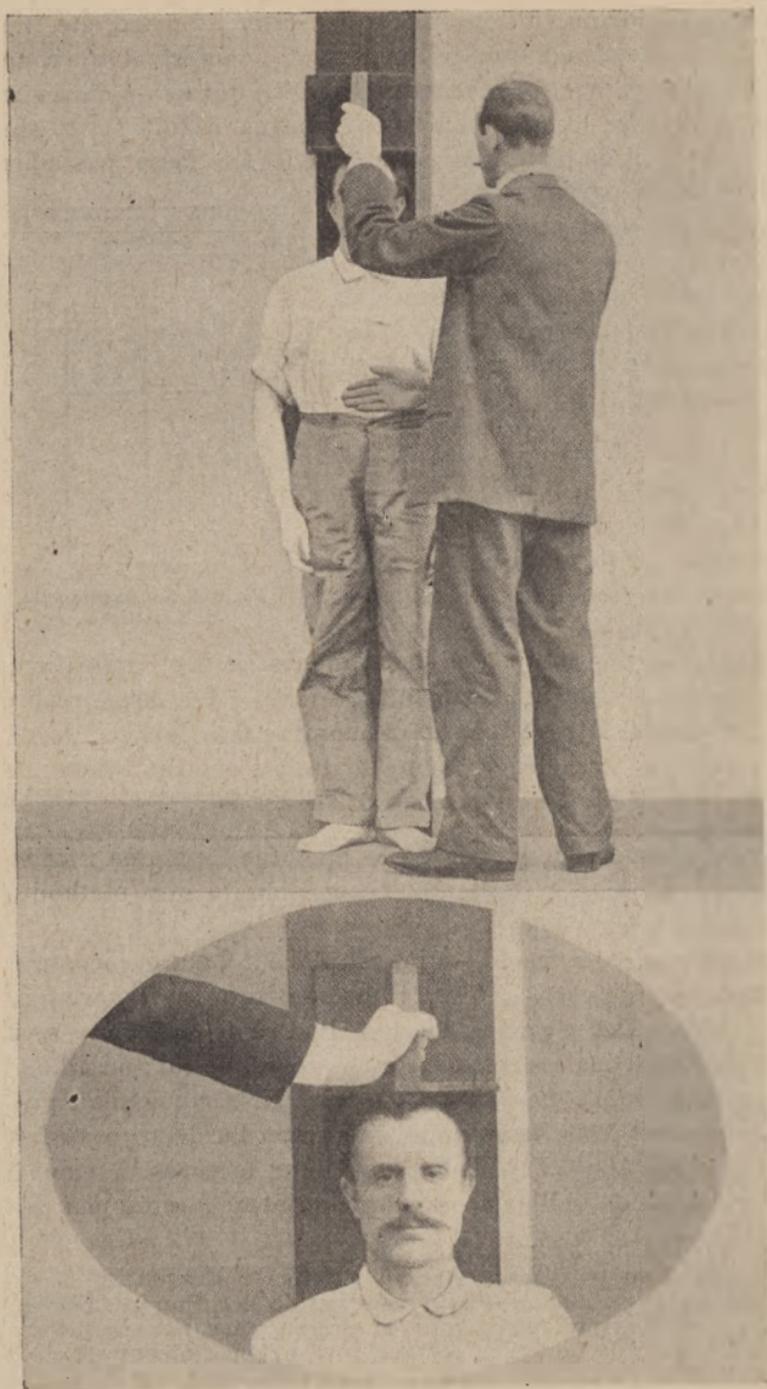


FIG. 165. — Mesure de la taille totale (d'après A. Bertillon).

attitudes courbées, en voûtant son dos, avançant le ventre, ou raccourcissant le cou; il devra, les pieds étant à plat, accuser *tout* son développement vertical (fig. 165).

La *toise anthropométrique* est facile à manier; en divers endroits, des employés de commissariats, des gardiens de prison s'en servent assez habilement.

En France, la taille moyenne varie entre 167<sup>cm</sup>,20 et 162<sup>cm</sup>,60. On a, par exemple :

| DÉPARTEMENTS        | TAILLE                | DÉPARTEMENTS         | TAILLE  |
|---------------------|-----------------------|----------------------|---------|
| Ain .. . . . . .    | 166 <sup>cm</sup> ,50 | Lot-et-Garonne ...   | 166 ,10 |
| Alpes-Maritimes ... | 166 ,50               | Meurthe.....         | 166 ,40 |
| Côte-d'Or.....      | 167 ,20               | Seine.....           | 163 ,80 |
| Eure .. . . . . .   | 166 ,30               | Tarn.....            | 162 ,60 |
| Haute-Savoie.....   | 166 ,20               | Vosges.....          | 165 ,70 |
| Jura.....           | 165 ,00               | <i>Moyenne</i> ..... | 165 ,00 |

Dans les différentes contrées, on a relevé les tailles suivantes :

|                     |   |                     |         |
|---------------------|---|---------------------|---------|
| Américains (1)      | { | blancs .....        | 171 cm. |
|                     |   | indiens .....       | 172     |
|                     |   | nègres .....        | 168     |
| Annamites .....     |   |                     | 158 ,50 |
| Arabes              | { | d'Algérie (2).....  | 165 ,60 |
|                     |   | de Tunisie (3)..... | 166 ,20 |
| Basques             | { | français .....      | 165 ,80 |
|                     |   | espagnols.....      | 163 ,80 |
| Cochinchinois ..... |   |                     | 157 ,10 |
| Corses .....        |   |                     | 163 ,30 |
| Ecosseis            | { | citadins.....       | 174 ,60 |
|                     |   | paysans.....        | 179 ,20 |

(1) D'après Gould (1869) et Baxter (1875).

(2) Sur les Berbères, la moyenne est plus élevée : 168 centimètres. Marie et Mac-Auliffe ont obtenu, depuis, 168<sup>cm</sup>,10, sur 136 Tunisiens; ce résultat est discutable (*C. R. Ac. Sc.*, 19 janvier 1920).

(3) D'une statistique de 800 cas que nous avons établie, grâce à l'amabilité de M. Louis Chenay, directeur du service anthropométrique; les sujets avaient de vingt à quarante-cinq ans (mission scientifique faite par nous en 1908 dans le nord de l'Afrique).



FIG. 166. — Mesure de la taille assise ou du buste (d'après A. Bertillon).

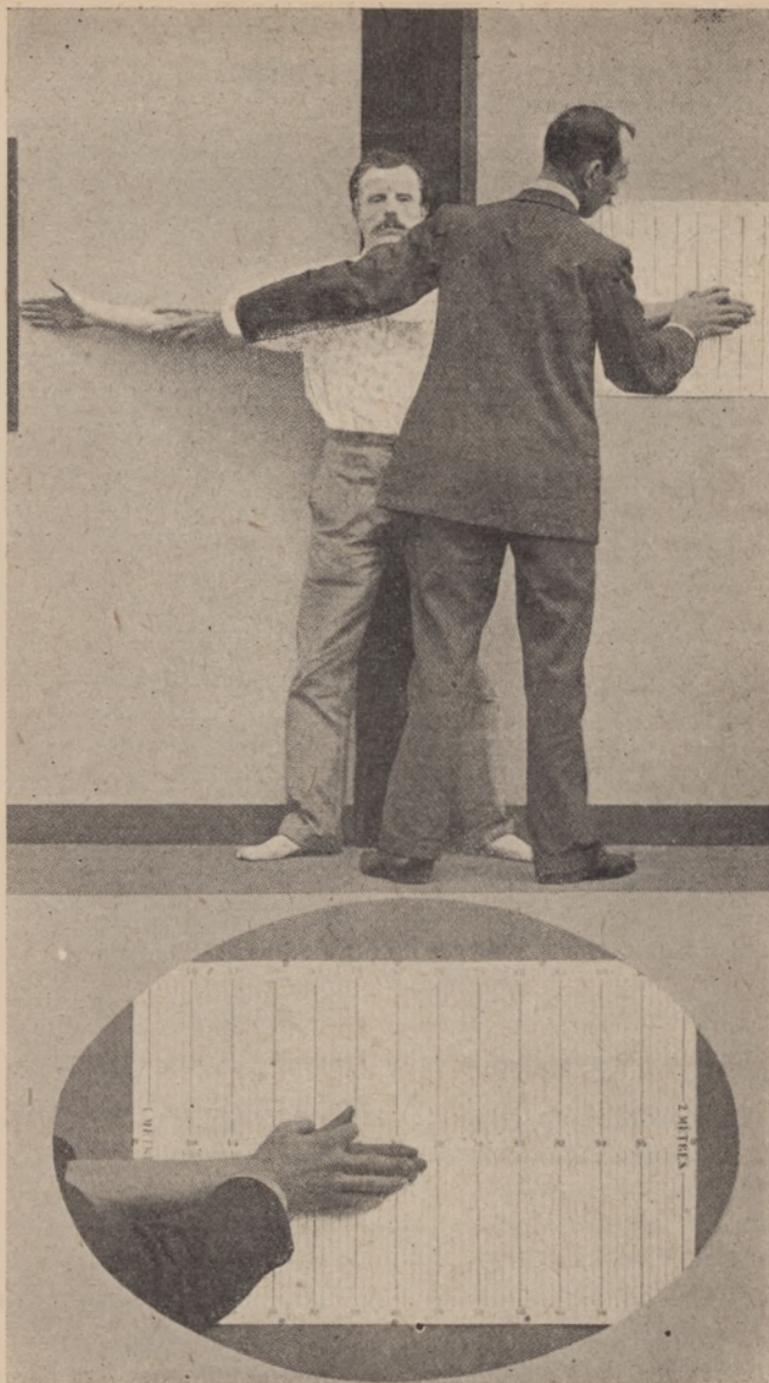


FIG. 167. — Mesure de l'envergure des bras (d'après A. Bertillon).

|                             |                       |
|-----------------------------|-----------------------|
| Espagnols.....              | 164 <sup>cm</sup> ,50 |
| Français.....               | 165 ,00               |
| Italiens.....               | 164 ,50               |
| Japonais.....               | 157 ,00               |
| Lapons <sup>(1)</sup> ..... | 153 ,00               |
| Nègres-Akkas.....           | 137 ,80               |
| Portugais.....              | 163 ,70               |
| Russes d'Europe.....        | 164 ,20               |

**210. Mesure du buste et du thorax.** — Cette mesure s'effectue le sujet étant assis sur un tabouret haut de 0<sup>m</sup>,40, de manière à avoir les fesses au mur et les jambes d'équerre, les épaules tombantes. On opère avec la règle et l'équerre, comme pour la taille, et on déduit 0<sup>m</sup>,40 (*fig.* 166).

L'*envergure* se détermine les bras bien tendus horizontalement et appuyés au mur (*fig.* 167).

Enfin, le *périmètre thoracique* s'obtient au moyen d'un ruban métrique passant sous l'angle inférieur des omoplates et la ligne des tétons. Au moment de faire la lecture, arrêter la respiration du sujet.

Le périmètre thoracique et la capacité vitale diffèrent suivant les races. On a trouvé, par exemple, sur les adultes :

|                | Périmètre thoracique | Capacité vitale       |
|----------------|----------------------|-----------------------|
| Français.....  | 0 <sup>m</sup> ,86   | 3 <sup>lit</sup> ,750 |
| Américains     | blancs...            | 0 ,84    2 ,709       |
|                | Indiens..            | 0 ,86    3 ,009       |
|                | nègres...            | 0 ,83    2 ,649       |
| Allemands..... | 0 ,86                | 3 ,222                |
| Anglais.....   | 0 ,88                | 3 ,772                |

En général, le périmètre varie entre 0<sup>m</sup>,80 et 0<sup>m</sup>,90 chez les Européens ; la capacité vitale entre 3 et 4 litres.

Au point de vue de la *croissance* et du développement pulmonaire, on a intérêt à observer les variations de forme du thorax, d'après des graphiques. Ceux-ci s'obtiennent par le *Thoracographe*. En voici le principe : Un cercle horizon-

(1) Et 147 centimètres pour les femmes (Prince Bonaparte, *C. R. Ac. Sc.*, 16 février 1920).

tal entoure le thorax à un niveau choisi, et ne prend contact avec lui que par l'intermédiaire d'un curseur inscrivant, mobile le long du cercle.

Le sujet se tient nu, les membres et la nuque appuyés.

Un dispositif à molette permet de tracer, en *réduction*, sur une feuille de papier, le graphique périmétrique, d'abord en expiration, puis en inspiration. L'espace entre ces tracés concentriques figure l'ampliation thoracique.

Le premier modèle de Thoracographe est celui de Sibson (1846); puis on eut ceux de Bergeon (1868), de Paul Bert (1870), de Fick, etc. Le récent modèle *Dufestel* est le plus pratique. Mais son usage, intéressant en hygiène, spécialement dans l'étude des enfants, sort du programme de cet ouvrage (1).

De même pour les *Stétographes*, sortes d'appareils pneumographiques doubles qui inscrivent *séparément* le jeu des parties droite et gauche du thorax (Voir *Les lois de l'Éducation respiratoire*, notre livre déjà cité).

On pourrait, du reste, isoler ces deux mouvements en fixant, au moyen de papier gommé, sur l'épine dorsale, le ruban du Pneumographe double; alors chaque tambour fournira des courbes respiratoires distinctes de celles de l'autre (Voir la figure 138, page 269).

### 211. Mesure de la surface et du volume du corps humain.

— La surface s'obtient généralement par la formule de Meeh (§ 82).

Le volume est donné par le volume d'eau déplacée quand le sujet plonge jusqu'aux oreilles dans une baignoire munie d'un trop-plein; le niveau initial de l'eau affluerait le trop-plein (*fig. 168*). La plongée devra se faire doucement après avoir fermé le robinet, et on notera la température du bain, laquelle devra être comprise entre 20 et 25°. Le liquide recueilli et *pesé* donnera le volume du corps immergé, à raison de  $(1\text{cm}^3 + \alpha)$  par *gramme*; suivant la température, on a pour  $1 + \alpha$  les valeurs ci-dessous :

(1) Voir un article de la *Clinique infantile* (n° du 15 juillet 1907).

| T     | $1 + \alpha$   | T     | $1 + \alpha$   |
|-------|----------------|-------|----------------|
| + 10° | $1 + 0,000273$ | + 19° | $1 + 0,001571$ |
| 11    | 1 ,000368      | 20    | 1 ,001773      |
| 12    | 1 ,000476      | 21    | 1 ,001985      |
| 13    | 1 ,000596      | 22    | 1 ,002208      |
| 14    | 1 ,000729      | 23    | 1 ,002444      |
| 15    | 1 ,000874      | 24    | 1 ,002685      |
| 16    | 1 ,001031      | 25    | 1 ,002938      |
| 17    | 1 ,001200      | 26    | 1 ,003201      |
| 18    | 1 ,001380      | 27    | 1 ,003473      |

La tête du sujet restant hors de l'eau, il faut en tenir compte, ce qui est assez difficile; le plus simple est de se boucher les oreilles avec du coton, et de plonger de manière à ne laisser hors de l'eau que le nez, la correction est alors insignifiante.

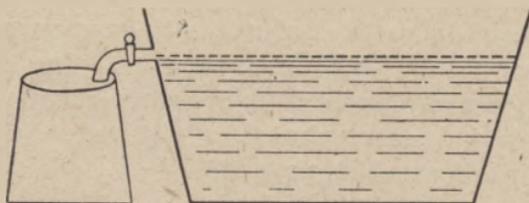


Fig. 168.

**212. Mesure du poids.** — Peser exactement le corps humain est une opération difficile. Le sujet doit être pesé *nu*, au lieu de déduire de son poids avec vêtements le poids de ces derniers; il doit être à jeun, sinon la nourriture et la boisson fausseront la pesée. En tout état de cause, on opérera le *matin au réveil*, avant toute alimentation. Pour comparer entre elles différentes pesées, de jour en jour, on choisira toujours la *même heure*, par exemple sept heures du matin.

La balance-basculé sera sensible à 5 grammes par 100 kilogrammes; une telle sensibilité est même insuffisante dans certains cas. En effet, l'erreur totale est de 10 grammes; de sorte que si, d'une pesée à la suivante, un sujet gagne

100 grammes, l'erreur relative atteindra 10 0/0 au maximum.

On aura soin que le sujet se tienne sur le plateau de la balance, le dos tourné à la graduation et en restant bien *immobile*.

Les balances pour peser les enfants en bas âge et les nourrissons doivent être très sensibles, et il en est facilement ainsi. Divers modèles, presque tous bons, se rencontrent dans le commerce ; ils sont du type Roberval et sensibles au gramme, pour une force de 10 à 15 kilogrammes.

**218. Mesures dynamométriques** — Les dynamomètres sont des ressorts dont les déformations sont proportionnelles aux forces qui les produisent (voir § 13). Le type en est le *peson ordinaire* : c'est une lame AB d'acier trempé, en forme de V ; à l'extrémité de la branche B est fixé un arc de fer *n*

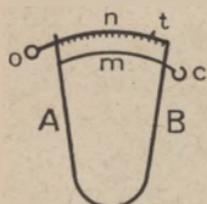


FIG. 169. — Peson ordinaire.

qui se prolonge et passe librement dans un œil pratiqué à l'extrémité de l'autre branche A. De celle-ci part un arc semblable *m*, qui s'engage de même dans B, et se termine par un crochet *c*. L'arc *n* porte un anneau *o* (fig. 169).

La graduation est faite en accrochant le peson par l'anneau *o* à un point fixe, et en suspendant au crochet *c* des poids marqués croissants ; on grave sur le secteur *n* des traits correspondant aux flexions de la branche A.

Pour ne pas dépasser la force compatible avec la limite d'élasticité du ressort, l'arc *n* porte un talon *t* où viendrait buter la branche A si la force était trop grande.

Veut-on, par exemple, mesurer l'effort de traction dans le transport d'un fardeau *P* ? On fixera le crochet *C* au fardeau

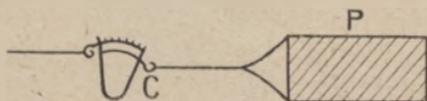


FIG. 170. — Traction des fardeaux.

et on tirera par l'anneau jusqu'à ce que le mouvement se produise. La valeur marquée sera celle de l'effort de traction (fig. 170).

214. Le dynamomètre de Régnier, construit à la demande de

Buffon, se compose de deux ressorts en acier A et B, unis à leurs extrémités par des étriers en fer C et D. Sur le milieu de la branche B se trouve une petite pièce de métal pouvant agir sur le levier articulé *lom*, grâce à la bielle *b*. La branche *m* du levier guide l'aiguille *l* sur un limbe gradué à l'avance

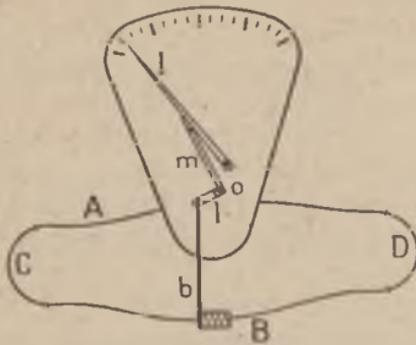


FIG. 171. — Dynamomètre de Régnier.

et porté par le ressort A. La graduation est double, correspondant aux efforts de traction — quand on fixe C et tire sur D (force renale) ou aux efforts de pression — quand on agit sur B (voir § 92 et fig. 171).

215. Les dynamomètres sont en nombre considérable ; on ne saurait — et d'ailleurs il est inutile — de les décrire tous. On fait usage, en clinique, de divers modèles, tel que celui de Bloch, le *sthenomètre*<sup>(1)</sup> : ici les déformations d'un ressort elliptique sont transmises par un pignon aux aiguilles ; la graduation est double, pour la traction et la pression (fig. 172).

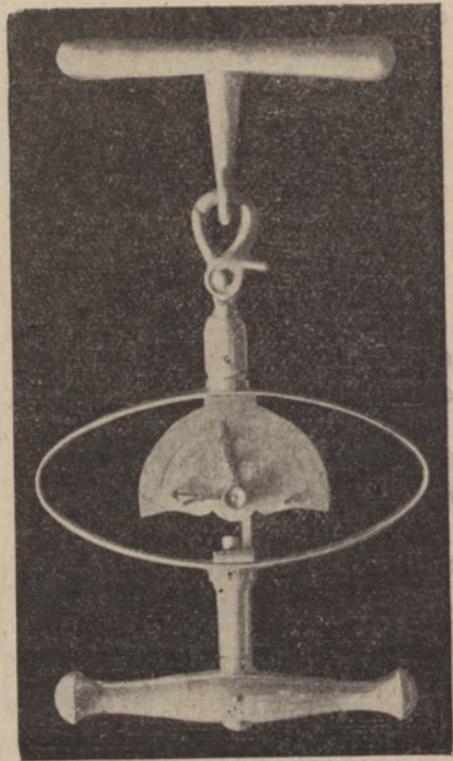


FIG. 172. — Sthenomètre de Bloch.

(1) Bloch (*Comptes rendus Biologie*, 1895).

216. **Dynamomètres enregistreurs ou dynamographes.** — Pour observer les variations de la force, Morin construisit, sur les indications de Poncelet, un dynamomètre enregistreur : la branche mobile du ressort porte une pointe tranchante qui se déplace sur un papier en proportion des déformations. On a ainsi des *ordonnées* proportionnelles aux efforts, pourvu que le papier se déroule devant la pointe parallèlement à la ligne des abscisses  $XX'$ . La valeur moyenne de l'effort est la moyenne arithmétique des ordonnées; on a :

$$y = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n}$$

Et son intensité, à tout moment, est exprimée par l'ordonnée correspondante. On l'évalue en kilogrammes après avoir déterminé la longueur d'ordonnée qui résulte d'une force connue (fig. 173).

Sur ce type de *dynamographe* ont été construits les modèles de Marey (1) (fig. 208), Héséous (2), Gréhan (3), Charles Henry (4), Hülss (5),

Verdin (6), de Waller (7). Ce dernier est usité en clinique, en Angleterre, et donne l'effort de pression de la main (fig. 174). D. Hondros (8) a décrit un modèle *isométrique* qui utilise le principe de notre *arthrodynamomètre*, dont il va être question.

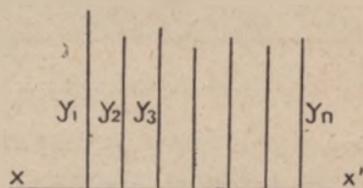


FIG. 173.

(1) Marey (Trav. de Laboratoire, I, 11; 1875).

(2) Héséous (*Journ. de Physique*, 1889).

(3) Gréhan (*Comptes Rendus Biologie*, 1894, 1892, 1897).

(4) Ch. Henry (*ibid.*, 1895).

(5) Cité et décrit par Krummacher (*Zeit. f. Biol.*, t. XXXIII, p. 135; 1896).

(6) Ch. Verdin (*Comptes Rendus Biologie*, 1896).

(7) A. Waller, *Physiol. humaine*, 1898.

(8) D. Hondros (*Journal de Physiol.*, 1920, p. 981).

Quels qu'en soient le nombre et la variété, les dynamographes connus ne suffisent nullement à enregistrer toutes les forces et composantes de forces qui se manifestent au cours du travail professionnel, dans les métiers ouvriers. Il a fallu s'ingénier, user d'artifices pour recueillir le tracé de ces efforts dans toutes les circonstances possibles. Nous allons voir comment.

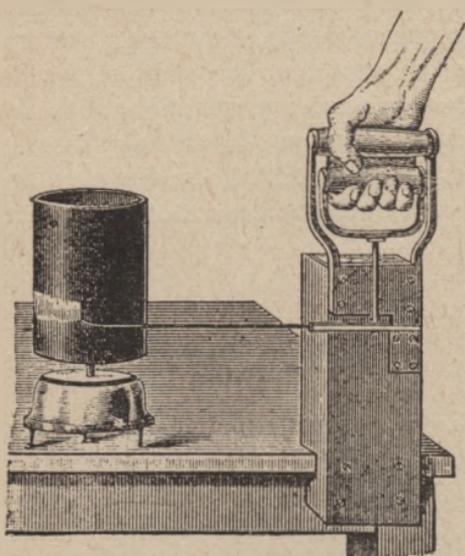


FIG. 174. — Dynamographe de Waller.

### 217. Enregistrement des efforts musculaires dans les diverses professions.

— Le principe qui a inspiré les expérimentateurs est celui de la méthode graphique de Marey : un ressort, convenablement disposé, d'une force appropriée, agit directement sur une poire en caoutchouc, ou sur un tambour de Marey ; les déformations seront traduites, par le mouvement de l'air et celui de la membrane élastique, sur un tambour récepteur que l'on placera devant un cylindre enregistreur. On est ainsi maître d'amplifier le tracé : les ordonnées seront proportionnelles aux efforts (voir § 223).

Imbert, après Marey et Demeny, a montré tout le parti qu'il était possible de tirer de la méthode graphique pour enregistrer les efforts des muscles sur les outils des ouvriers. Sa technique doit trouver place ici immédiatement, quel que discutables qu'en soient les résultats.

**218. Manœuvre du cabrouet et de la brouette (1).** — Tout d'abord le *cabrouet*, vulgairement « diable », possède deux

(1) A. Imbert (*Bulletin de l'Inspection du Travail*, n° 5 ; 1905 ; n° 1 et 2, 1909 ; — *Revue d'hygiène et de police sanitaire*, t. XXXI, 1909, n° 8).

roues qui assurent son équilibre latéral (fig. 175); et ces roues ont un faible diamètre, ce qui oblige l'ouvrier agissant sur les manches à incliner très peu ses bras : la *composante horizontale* de son effort est ainsi réduite (§ 14), mais l'équilibre est stable.

Dans la brouette, au contraire, il existe une seule roue de plus grand diamètre (fig. 176) ; l'équilibre latéral est donc instable, l'effort de *soutien* plus considérable, mais aussi l'effort dans la direction du mouvement fournit une composante plus grande suivant l'horizontale.

Le cabrouet est destiné à transporter de lourds fardeaux, généralement un par un. La brouette sert à transporter les objets très divisés, tels que pierre, sable, gravier, terre,

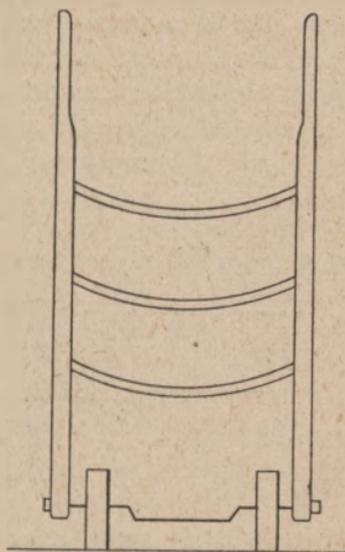


FIG. 175. — Diable ou cabrouet.

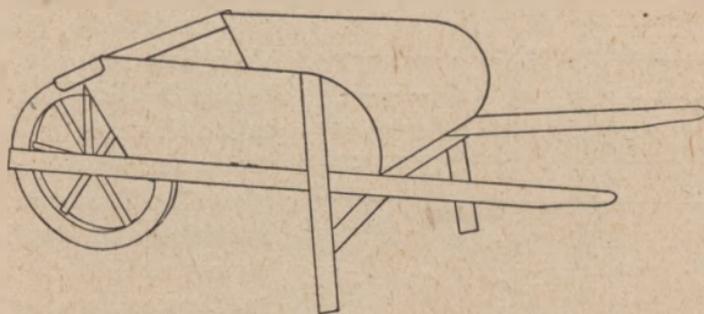


FIG. 176. — Brouette à une seule roue.

mortier et autres matériaux de construction. Le premier de ces instruments est lourd ; d'ailleurs sa manœuvre exige souvent deux à trois hommes ; l'autre a un poids moyen de

30 kilogrammes et une capacité de 20 à 30 de mètre cube un seul homme le manœuvre.

Les efforts musculaires qu'il s'agit d'enregistrer sont exercés *normalement* aux manches, pour soutenir la charge, et *parallèlement* aux manches pour déterminer la traction ou la pression nécessaire au mouvement du véhicule.

1° *Efforts exercés normalement aux manches.* — L'un des manches du cabrouet est scié à 0<sup>m</sup>,30 de l'extrémité libre,

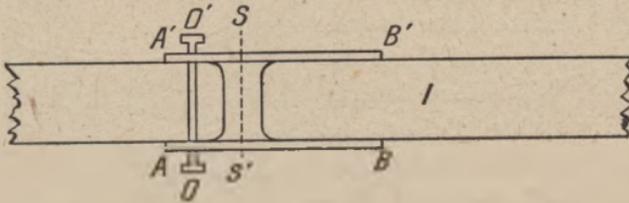


FIG. 177. — Face antérieure du manche.

suivant  $SS'$ . La partie attachée  $I$  est, alors, munie, sur ses faces latérales, de deux plaques métalliques  $AB, A'B'$ , qui viennent prendre la partie sectionnée en s'articulant avec un axe  $OO'$  qui la traverse sans frottement (*fig. 177*).

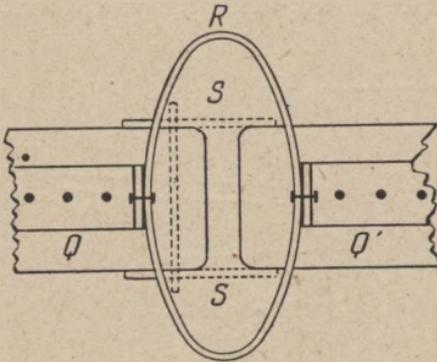


FIG. 178.

Face antérieure munie du ressort ovale  $R$ .

D'autre part, on applique sur la face *antérieure* du manche un ressort  $R$  ovale, et on le visse aux rebords verticaux de deux plaques métalliques  $Q$  et  $Q'$  fixées sur la même face (*fig. 178*). Et sur la face *postérieure* on applique deux tringles métalliques analogues dont les rebords verticaux soutiennent

l'un, un tambour de Marey  $T$ , l'autre une tige  $m$  qui en actionne la membrane (*fig. 179*). En réalité, la liaison de la tige  $m$  avec la membrane du tambour est plus com-

pliée, et indirecte ; elle utilise un levier qui permet de modifier l'amplitude des oscillations de la membrane du tambour. De toutes façons, pour une même rotation de l'extrémité du manche autour de l'axe  $OO'$ , la membrane pourra recevoir un déplacement facile à régler et le tambour transmettre des mouvements plus ou moins amples.

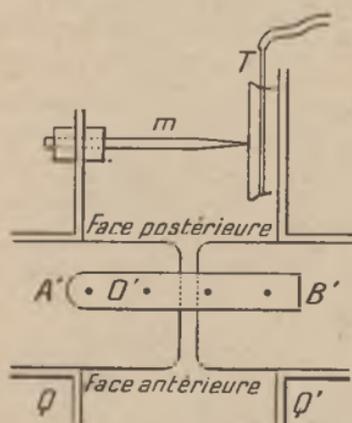


FIG. 179

On se contentera de faire subir ces transformations à un seul des deux manches, les efforts de l'ouvrier étant sensiblement symétriques.

2° *Efforts exercés suivant les manches.* — Pour cette seconde détermination, un manche est rendu cylindrique et enveloppé d'un manchon métallique  $M$  ; celui-ci porte un rebord  $H$  opposé à un rebord fixe  $H'$ , et à l'un et à l'autre se trouve vissé un ressort ovale  $R'$ .

Sur la face opposée on a disposé un système de tambour et de tige comme celui décrit précédemment.

Dans ces conditions, « lorsque l'ouvrier, tenant à la main le manche du cabrouet par le manchon  $M$ , effectue un effort de poussage ou de traînage, cet effort détermine, quant au manchon  $M$ , un glissement, d'ailleurs limité par le ressort  $R'$ , et transmis à la membrane du tambour » <sup>(1)</sup> (fig. 180).

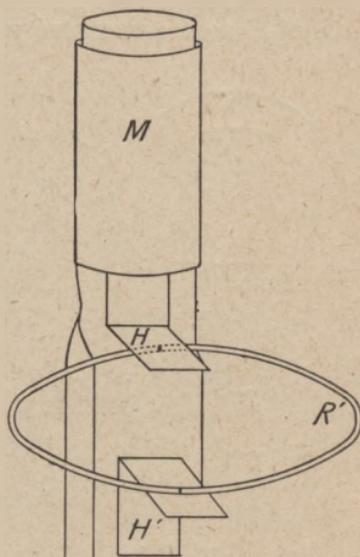


FIG. 180.

(1) A. Imbert (*loc. cit.*, p. 3-5 ; tirage à part, 1906).

Ainsi les efforts normaux et parallèles aux manches seront inscrits sur un cylindre par des tambours récepteurs conjugués avec les tambours transmetteurs.

219. Dans la manœuvre du cabrouet, comme dans les déplacements d'une charge en général, on doit porter cette charge sur un véhicule en la tirant. Imbert utilise, dans ce but, un ressort ovale muni d'une poignée P et qui porte, sur une de ses branches, un tambour de Marey réuni à l'autre branche par une tige rigide t. L'ouvrier accrochera le fardeau et le fera basculer, exerçant son effort sur la poignée P (fig. 181).

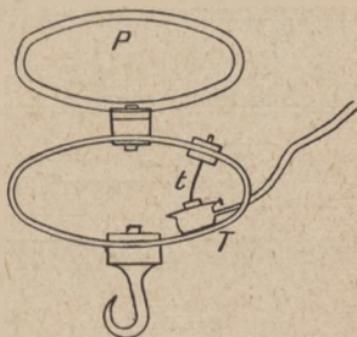


FIG. 181.

Celui-ci sera enregistré grâce au tambour récepteur conjugué avec le tambour T.

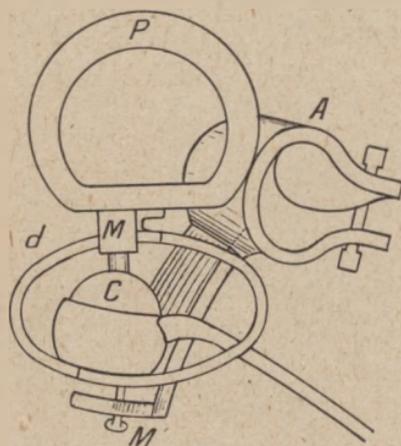


FIG. 182.

Une poignée du même genre pourra servir à évaluer l'effort de soutien des manches d'une *brouette*. Imbert fixe le ressort à deux pièces métalliques M et M', l'une soudée à la poignée P (fig. 182), l'autre à un anneau A qui embrassera le manche.

Ainsi, l'effort de soutien déformera le ressort ; on transportera ces déformations à une poire en caoutchouc C, logée dans une

cupule métallique, par l'intermédiaire d'un petit disque, et conjuguée avec un tambour récepteur de Marey.

Le professeur de Montpellier a même, en ce qui concerne la brouette, amélioré le procédé d'exploration de

l'effort parallèle aux manches : deux tringles de métal sont appliquées sur ceux-ci, suivant PQ et P'Q', et portent inférieurement des anneaux où glissent deux tiges de fer robuste terminées par les poignées I et I' (fig. 183). Ces deux tiges sont rivées à une traverse métallique HL absolument détachée des manches, mais qui reçoit l'une des extrémités d'un fort ressort à boudin R, l'autre extrémité étant fixée sur la tringle P'Q'. Dans ces conditions, saisissant les poignées I et I',

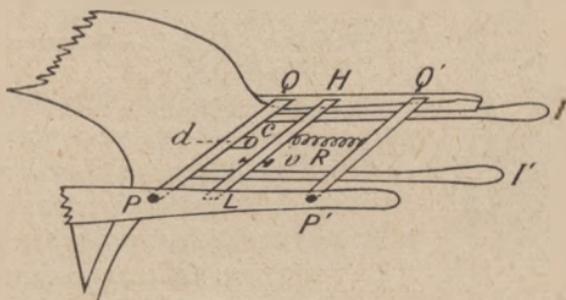


FIG. 183.

l'ouvrier exercera un effort sur la traverse HL, dont les déplacements seront limités par le ressort R. Ces déplacements sont traduits par les déformations d'une petite poire en caoutchouc logée en c dans une cupule et en contact avec un petit disque d; on amène le contact grâce à la vis v.

Ce dispositif <sup>(1)</sup> est plus sensible et surtout plus correct que celui du cabrouet.

220. **Chaussure exploratrice de Marey.** — L'effort exercé par le pied sur le sol, sur une pédale, sur l'axe d'une roue pour l'immobiliser au cours d'une manœuvre, sur un objet ou une personne, dans les exercices sportifs, peut être enregistré en munissant la chaussure d'un tambour explorateur approprié. Le modèle de Marey <sup>(2)</sup> comprend une semelle épaisse en caoutchouc à l'intérieur de laquelle se trouve une

(1) A. Imbert (*Bull. Insp. travail.* n° 1 et 2; 1909; tirage à part, p. 8-9).

(2) Marey, *La Méthode graphique*, p. 155 et 497; 1878.

petite poche compressible. Les appuis et levers du pied donnent lieu à une expulsion ou à une rentrée d'air pouvant actionner un tambour récepteur. S'il s'agit de la marche, le



FIG. 185.

est introduite sous le pied du sujet et vient appuyer sur le bouton saillant qui actionne la membrane de la caisse. La pression du pied chasse plus ou moins d'air à travers un tube de caoutchouc qui monte derrière le talon (fig. 186). Ce dispositif convient surtout à l'étude de la marche.

Tatin (1843-1913) a encore donné le modèle d'une *semelle à soufflet* pouvant s'adapter à la chaussure et d'une construction extrêmement simple.

sujet portera à la main un petit cylindre enregistreur (fig. 184 et 185).

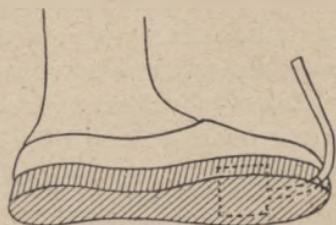


FIG. 184. — Chaussure exploratrice.

On doit reconnaître, toutefois, que la poche à air n'est pas en contact avec la surface du pied tout entière et qu'il doit résulter de là des évaluations assez incertaines de l'effort produit.

Du reste, une telle chaussure ne permet pas d'effectuer de longues marches.

Marey usa d'un autre artifice : la caisse à air, contenant un ressort de laiton, est placée à l'intérieur du talon d'une chaussure ordinaire. Une languette d'acier formant semelle

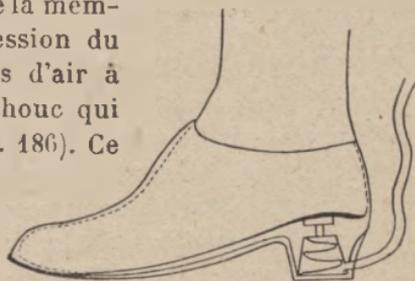


FIG. 168. — Semelle exploratrice.

221. **Trottoir dynamographique Amar.** — Marey employa, pour l'étude de la *locomotion*, un plancher dynamographique (§ 280) dont on verra plus loin les défauts. J. Amar a établi un modèle dit *Trottoir dynamographique* convenant à l'enregistrement de tous les mouvements verticaux, latéraux et antéro-postérieurs. Évidemment il sert d'abord à l'analyse de la locomotion, soit normale, soit pathologique, et à celle des amputés. Ces deux derniers cas ont fait l'objet

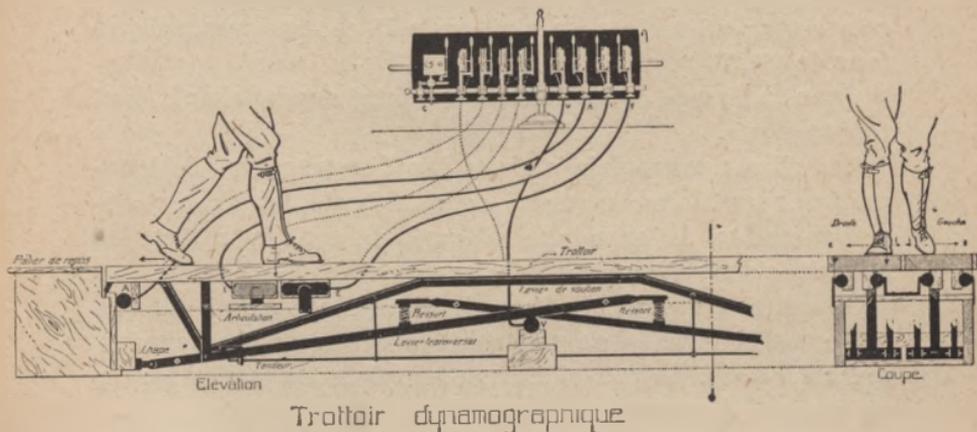


FIG. 187.

d'un développement spécial dans *Organisation physiologique* (p. 277 et suiv.).

Les caractéristiques du Trottoir Amar sont les suivantes<sup>(1)</sup> (fig. 187). Des leviers en fer, convenablement articulés, portent sur toute sa longueur un plancher mobile. Ils lui permettent d'osciller d'avant en arrière et latéralement, soit de dehors en dedans, soit dans le sens opposé. Ils s'entrecroisent au milieu du plancher où ils viennent s'appuyer sur des ressorts à boudin d'une force de 40 kilogrammes chacun.

On a logé, aux points où s'exercent les pressions, des poires de caoutchouc conjuguées avec des tambours inscripteurs.

On obtient ainsi *quatre sortes de forces* : la pression totale

(1) J. Amar (*Comptes Rendus Ac. Sc.*, 31 juillet 1916).

à l'appui de la jambe, l'impulsion antéro-postérieure du pied qui va se lever en quittant le plancher, et les poussées latérales, interne et externe. Un grand cylindre enregistreur à poids, dont la vitesse se règle par des ailettes, recueille les *traces locomoteurs*. On en verra un, relatif à la marche normale, sur la figure 262 (page 507).

Les deux planchers *symétriques*, pour jambes droite et gauche, forment une caisse close, avec marche de repos où le sujet se tient avant l'expérience. La longueur de cette caisse est de 3 mètres, sa largeur de 45 centimètres, sa hauteur de 0<sup>m</sup>,25.

Quant à l'usage du trottoir, il est *extrêmement simple* (1) et toujours sûr.

Les efforts musculaires, dans les divers modes de locomotion, sont fournis par lui, avec la durée, les phases correspondantes, la grandeur si variable qu'elle a dans la course, le saut et autres exercices sportifs.

Un autre avantage du Trottoir dynamographique est que la personne étudiée ne s'astreint à aucun artifice expérimental, *chaussures spéciales*, par exemple. Elle peut marcher pieds nus, et accuser également les différents états pathologiques de sa marche, etc.

**222. Outils munis d'explorateurs : composantes des efforts.**  
— Imbert (2) appliqua le système d'enregistrement de Marey à un outil très en usage dans le Midi : le *sécateur*, qui sert à débiter en boutures de longs sarments provenant des vignobles américains et d'épaisseur variable ; il a la forme de ciseaux, c'est-à-dire d'un *levier du premier genre* (fig. 188 et voir § 53), le point d'appui étant à l'articulation ; par suite, l'effort sera d'autant plus grand que le sarment à couper se trouvera plus loin de cette articulation.

L'évaluation de cet effort nécessite donc le choix d'une position constante pour le sarment, avec un même outil.

(1) On peut lire des détails plus complets dans : Jules Amar (*Revue de Chirurgie* de juillet-août 1919).

(2) A. Imbert (*Revue d'hygiène et de police sanitaire*, t. XXXI, n° 8 ; 1909 ; tirage à part, p. 18 ; — *Revue d'économie politique*, 1909 ; — *Revue générale des Sciences*, 1911, p. 481).

Voici de quelle manière a procédé Imbert. Le manche MN du sécateur est sectionné en S, et les deux parties sont réunies au moyen d'une charnière qui permet au tronçon SN de tourner autour de l'axe O ; mais, ce faisant, il tire sur une lame d'acier AB qui est rivée sur la pièce P d'une part, et se réunit, d'autre part, à une chape BC. Toute flexion de la lame d'acier AB, dans les efforts de coupe, est transmise à une poire en caoutchouc K placée entre elle et le manche MN du sécateur. La poire est mise en rapport, par un tube élastique, avec le tambour récepteur.

Un arrêt *a*, soudé sur la lame L, permet de placer les sarments toujours à la même division.

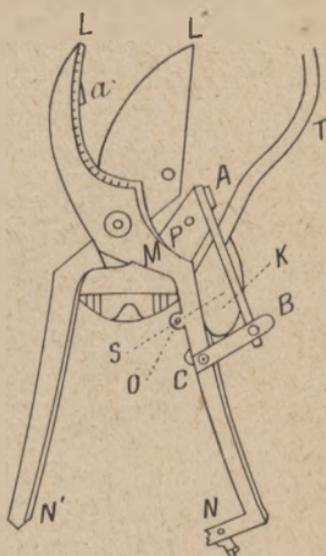


FIG. 188. — Sécateur.

223. Imbert réussit également à enregistrer les efforts dans le *travail à la lime*, c'est-à-dire la pression exercée sur l'étau, les pressions de la main gauche qui conduit l'outil, l'effort de poussée de la main droite sur le manche. Mais il n'a pas publié sa technique<sup>(1)</sup>. En reprenant cette étude, voici comment nous avons procédé<sup>(2)</sup> : la pièce à limer, un cylindre de laiton par exemple, est disposée dans un support dynamométrique tel que celui de la figure 189 et suffisamment expliqué par elle. On enregistre ainsi la pression verticale sur l'étau. D'autre part, la lime (*fig. 190*) permet d'enregistrer l'effort de la main droite sur le manche (composante horizontale) et ceux de la main gauche. On verra plus loin les calculs (§ 325).

Le support dynamométrique, placé dans l'étau, donnera

(1) A. Imbert (*Revue générale des Sciences*, 1911, p. 485).

(2) Jules Amar (*Journ. de Physiol.*, janvier 1913, p. 62).

la pression verticale des deux mains pour faire mordre la lime (P, *fig. 189*).

Le dispositif à ressorts de la lime fournit cette pression pour la main gauche (A) et aussi la composante horizontale (B, *fig. 191*); enfin le manche permet d'enregistrer la

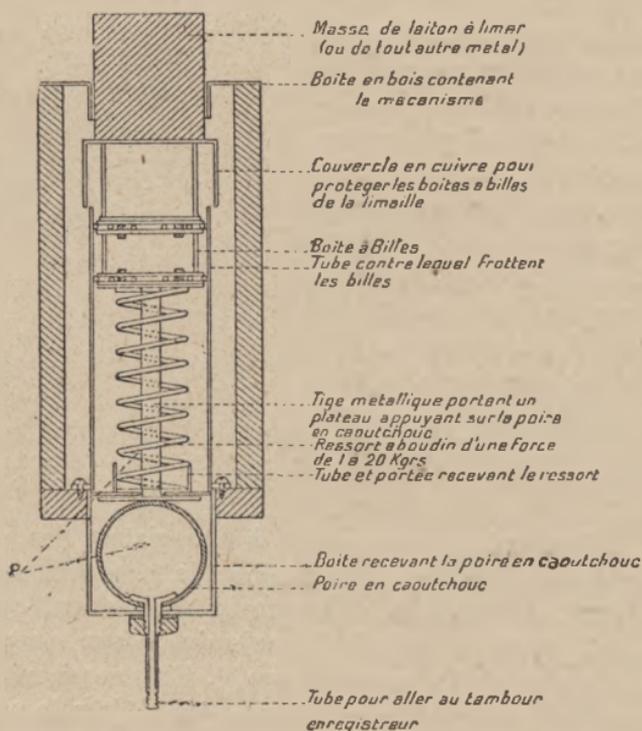


FIG. 189. — Support dynamométrique de l'auteur.

composante horizontale de la main droite (C, *fig. 190*). Des roulements à billes réduisent les frottements, et la force des ressorts est appropriée au genre de travail.

Les poires en caoutchouc, que l'on relie aux tambours récepteurs de Marey, sont placées aux points d'application des efforts, qui les déforment par l'intermédiaire de petits disques métalliques tangents. Celle du manche, contrairement à la figure 190, aboutit sur le côté, et non plus sur

le bout, disposition qui permet de tenir le manche dans le creux de la main.

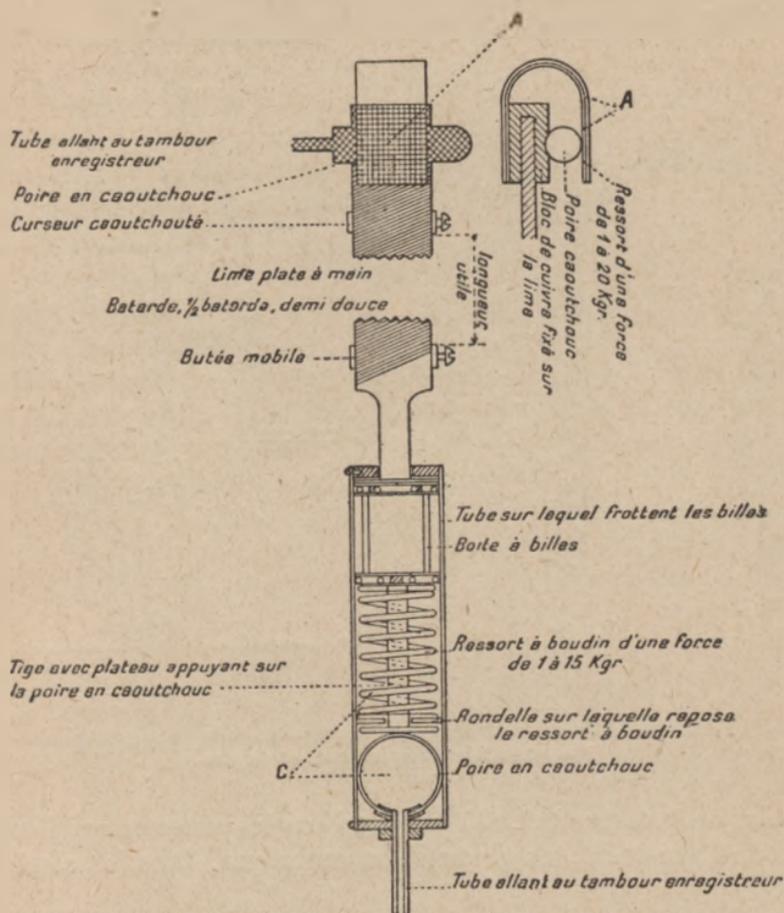


FIG. 190. — Lime dynamométrique (Le bout du manche sort sur le côté).

Nous avons, d'après le modèle de lime, constitué un rabot ou varlope inscrivants, et une pelle dynamographique, cette dernière plus spécialement conçue pour le travail agricole (1).

(1) Voir Jules Amar, *Le devoir agricole et les blessés de guerre*, brochure in-8°; Paris, 1918; — et *Organisation physiologique du travail* (loc. cit.).

224. Évaluation des efforts en kilogrammes. — Soit un tracé, obtenu grâce au style du tambour récepteur, tel que

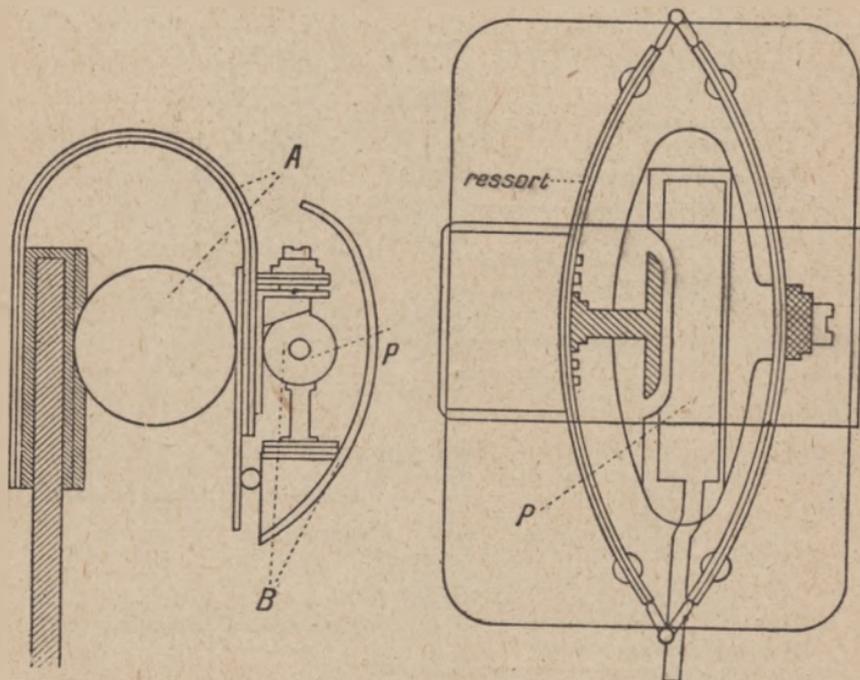


FIG. 191. — Ressort elliptique pour le poussage de la main gauche.  
(La partie B est vue de profil et de plan.)

celui de la figure 192. Si l'on remplace les muscles qui l'ont donné par des poids gradués, on saura que, dans les condi-

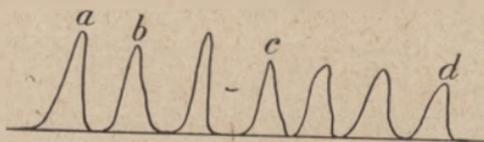


FIG. 192. — Graphique des efforts.

tions du tracé, une ordonnée de 1 millimètre équivaut, par exemple, à 1 kilogramme.

Ainsi, dans le cas très simple du crochet à main (§219), en admettant qu'il ait conduit au graphique de la figure 192,

nous fixerons la poignée d'une manière invariable, et nous suspendrons au crochet des poids gradués : pour 5, 10, 15, 20, 25 kilogrammes, nous aurons les ordonnées de la figure 193. Comparant au tracé musculaire, nous déduirons de la graduation que les efforts  $a, b, c, d$  équivalent respectivement à 13, 9, 8 et 6 kilogrammes.

Cette graduation ou cet étalonnage sont toujours possibles ; ils sont d'ail-

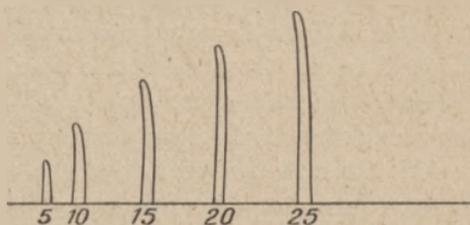


FIG. 193. — Étalonnage des efforts.

leurs nécessaires. Considérons d'abord le cabrouet, la brouette et autres chariots similaires. Il faut déterminer l'effort de soutien et celui d'où résulte la progression. Pour l'un, à la hauteur où l'ouvrier maintiendra les manches,

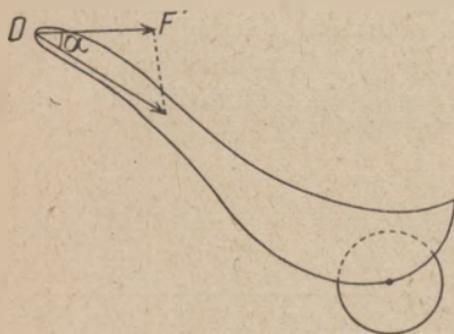


FIG. 194. — Efforts de progression du cabrouet.

suffira de remplacer les muscles des bras par une corde attachée aux manches par ses deux extrémités et accrochée, par le milieu, à un peson ordinaire (§ 213). Pour l'effort de progression, il importe de faire état de l'inclinaison des manches pendant le

transport. En effet, l'effort exercé sur un manche intervient, dans la progression, par sa composante horizontale  $OF'$  et l'on sait (§ 3) que  $OF'$  varie comme le cosinus de l'angle  $\alpha$ . Or le cosinus est d'autant plus petit que l'angle  $\alpha$  est plus grand, c'est-à-dire l'inclinaison plus grande. La valeur nécessaire  $OF'$  pour vaincre les frottements de la roue sur son axe et sur le sol dépendra donc beaucoup de l'inclinaison (fig. 194).

D'autre part, ces frottements sont différents suivant que

le fardeau a son centre de gravité plus ou moins voisin de l'axe de la roue, et qu'une partie de son poids agit plus ou moins sur les bras de l'ouvrier.

Ainsi l'évaluation de l'effort doit se rapporter à des circonstances parfaitement définies. Imbert se contente de mesurer l'effort de progression quand le centre de gravité du fardeau se trouve dans le plan des axes des roues : il réunit les manches par une corde dont le milieu est relié par une autre corde à un plateau, après avoir passé sur une poulie. On met des poids dans le plateau jusqu'au moment où la progression du cabrouet est assurée (on ne fait pas état de la valeur du démarrage, qui est toujours un peu plus grande).

La véritable mesure de l'effort musculaire doit être obtenue en intercalant un dynamomètre gradué entre le manche et la main, et poussant jusqu'à faire tracer au style inscripteur des ordonnées égales aux ordonnées résultant de la progression.

225. L'étalonnage est très simple s'il s'agit du sécateur (fig. 195) : on fixe le manche N'L' dans les mâchoires d'un étau, de manière que la partie SN soit horizontale, et on

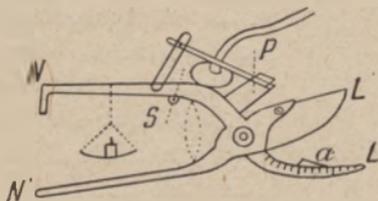


Fig. 195. — Etalonnage du sécateur.

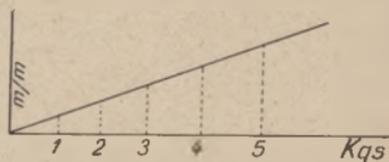


Fig. 196. — Tracé des efforts au sécateur.

remplace le ressort du sécateur (en pointillé) par une pièce rigide. Il suffit alors de suspendre, par le milieu de SN, des poids graduellement croissants pour obtenir la valeur en kilogrammes des ordonnées. Si l'on porte les kilogrammes en abscisses, on aura une courbe comme celle de la figure 196.

Pour les divers outils que nous avons considérés, la graduation se fait aisément au moyen d'un plateau de balance Roberval chargé de poids. Aucune technique spéciale n'est à indiquer : il suffira d'un peu d'ingéniosité.

L'effort minimum qu'exige la manipulation d'un outil est une valeur qu'il faut connaître, afin de ne pas charger d'une besogne fatigante les sujets qui n'ont pas la force musculaire nécessaire (femmes et enfants), et de ne pas les exposer, ce faisant, à une fatigue trop rapide.

**226. Arthrodynamomètre.** — Sous le nom d'*Arthrodynamomètre* <sup>(1)</sup>, nous avons enfin décrit un instrument qui permet d'évaluer la force de flexion ou d'extension d'une articulation de nos membres, et de donner, en même temps, l'amplitude du mouvement.

Comme l'arthrodynamomètre sert particulièrement à tous les cas d'impotence, pour apprécier une *incapacité de travail*, on en a réservé la description et les applications <sup>(2)</sup>. Nous dirons seulement qu'il est conçu suivant le principe de l'*isométrie*; il fait intervenir une crémaillère pour commander les aiguilles d'un cadran des forces, et d'autre part il fournit les angles des mouvements articulaires de nos membres. De là son nom.

(1) J. Amar (*Comptes Rendus Acad. Sciences*, 7 juin 1915).

(2) *Organisation physiologique du travail*, p. 158 et 245.

## CHAPITRE II

### LES MESURES : ÉLÉMENTS DYNAMIQUES DE LA MACHINE HUMAINE

227. **L'évaluation du travail.** — Le dynamographe, s'il est disposé de manière à fournir l'effort et le déplacement du point d'application de cet effort, est un instrument propre à mesurer le travail. Son tracé figure, à tout instant, la valeur de l'effort et la grandeur du déplacement. Supposons que les muscles produisent un effort constant, représenté par les ordonnées  $y_1, \dots, y_n$ , en  $n$  secondes, et déplacent la résistance qui leur est opposée de longueurs telles que  $ox_1, x_1x_2, \dots, x_{n-1}x_n$ , le travail total des muscles sera la somme des surfaces  $ox_1 \times y_1 + x_1x_2 \times y_2 + \dots$  soit  $ox \times y$  (fig. 197). Si l'effort était variable, on aurait l'aire totale de la figure 198.

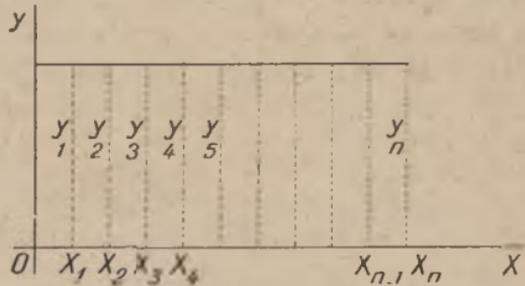


FIG. 197.

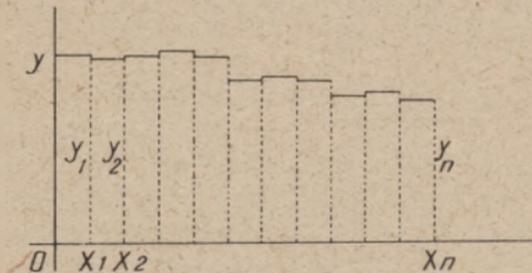


FIG. 198.

Si les variations de l'effort étaient continues, le nombre

ordonnées  $y_1, \dots, y_n$ , en  $n$  secondes, et déplacent la résistance qui leur est opposée de longueurs telles que  $ox_1, x_1x_2, \dots, x_{n-1}x_n$ , le travail total des muscles sera la somme des

des rectangles serait tel que le graphique se rapprocherait de la forme d'une courbe C (fig. 199) et qu'il s'agirait de trouver l'aire OABX.

Quand les déplacements sont très grands, on les réduit d'une manière *proportionnelle*, sachant, par exemple, que 1 millimètre représente 10 centimètres

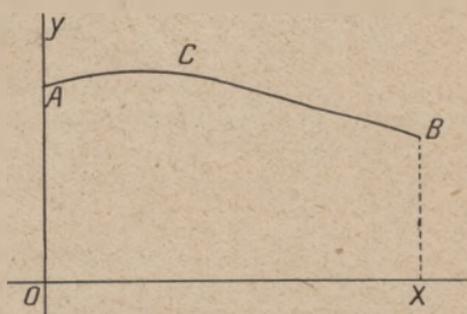


FIG. 199.

ou 1 mètre, ou même 1 kilomètre. C'est ce qui a lieu dans

l'inscription du travail de la vapeur d'une chaudière, au moyen de l'*indicateur de Watt* : on obtient une courbe dont un point quelconque représente à la fois la position du piston (chemin parcouru) et la valeur de la *pression* de la vapeur. L'aire de la courbe sera la mesure du *travail indiqué* (§ 63) de la machine. La forme des courbes obtenues est

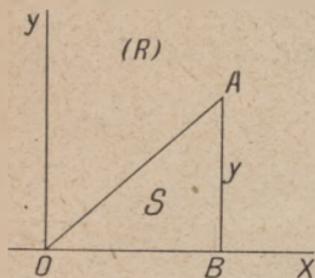


FIG. 200.  
Aire du triangle rectangle.

quelconque ; mais parfois c'est celle de courbes connues :

triangle rectangle (fig. 200) (R), trapèze (T), ellipse ou cercle (E, C), segment de parabole (P), sinusoïde (S), etc. Les aires sont alors respectivement les suivantes :

Triangle rectangle :

$$S = \frac{OB \times AB}{2};$$

Trapèze (fig. 201) :

$$S = \frac{AB + OC}{2} \times AD;$$

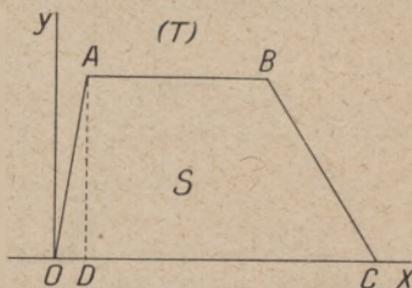


FIG. 201. — Aire du trapèze.

Demi-ellipse :

$$S = \frac{\pi \times OA}{2} \times AB \text{ (ou } AB') \text{ (fig. 202);}$$

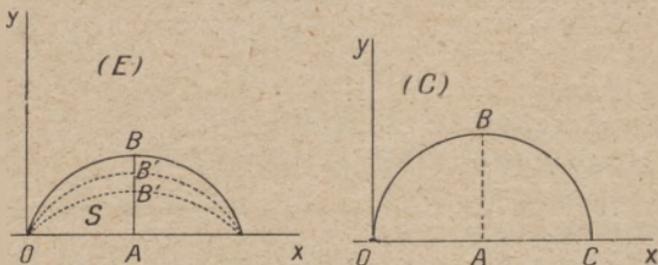


FIG. 202. — Aires de l'ellipse et du cercle.

Demi-cercle :

$$S = \frac{\pi \times \overline{AB}^2}{2} \text{ (fig. 202);}$$

Segment de parabole :

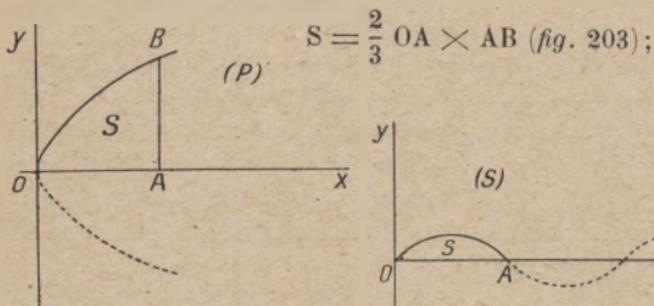


FIG. 203. — Aire de la parabole.

FIG. 204. — Aire de la sinusoïde.

Aire de la sinusoïde :

$$S = 2 \text{ (fig. 204).}$$

228. — Le problème de la détermination des aires planes, c'est-à-dire des courbes tracées dans un plan et dont l'équation générale est :

$$y = f(x),$$

s'appelle problème des *quadratures*. Il revient toujours à l'intégration de l'équation  $y = f(x)$ , ou à la recherche d'une fonction

(voir § 4). Pratiquement, on a construit des *intégrateurs* ou *planimètres* permettant d'évaluer les aires, en d'autres termes le *travail*. Ce sont des systèmes de leviers articulés, tournant autour d'un axe fixe, et portant un rouleau compte et un crayon mobile. Pendant que le crayon passe sur le contour de l'aire à mesurer, le rouleau tourne d'un angle proportionnel à la surface et donne la valeur de celle-ci. Le planimètre d'Amsler est un des plus répandus. Le modèle courant, dit « à compensation », se compose de deux tiges AP et AT (*fig. 205*) articulées en A par une *articulation*

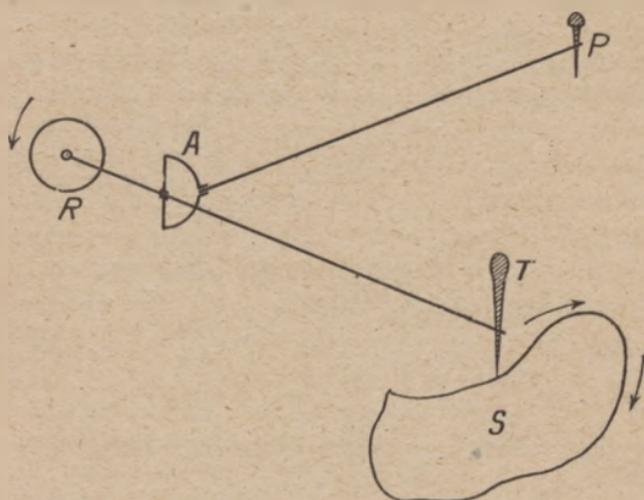


Fig. 205. — Planimètre d'Amsler.

*universelle*. On fixe la pointe P en un point du plan sur lequel est tracée la courbe S dont on veut mesurer l'aire; et on promène la pointe du traçoir T sur le contour de la surface donnée.

Pendant ce mouvement, une roulette R, solidaire de la tige, tourne d'une quantité proportionnelle à la surface à mesurer. On a  $S = K \times n$ , K étant une constante instrumentale, n le nombre de tours et fractions de tours de la roulette. Un compteur, disposé sur la tige AP, donne les tours complets, et un vernier, fixé à la roulette, les fractions de tour.

Supposons que la lecture soit 2.500 unités avant, 2.560 après la mesure. On a :  $n = 2.560 - 2.500 = 60$ . D'autre part, l'articulation A étant placée en un point de la tige AT, on lit en ce point la valeur de K : elle y est marquée en millimètres carrés. Soit  $K = 9$  millimètres carrés. Donc :

$$S = K \times n = 9 \times 60 = 540 \text{ millimètres carrés.}$$

La correction des erreurs, « la compensation », se fait en laissant la pointe P en place, et amenant la roulette dans une position symétrique à l'ancienne (fig. 206). On effectue donc deux mesures, en réalité,  $S_1$  et  $S_2$ ; la valeur exacte sera :

$$S = \frac{S_1 + S_2}{2},$$

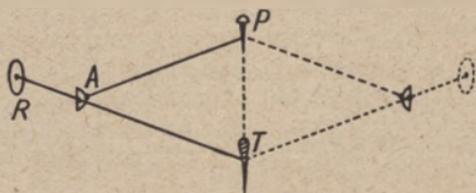


FIG. 206.

Un procédé simple de détermination des aires est celui de la pesée des traces (§ 82) comparativement au poids d'un centimètre carré du même papier. On choisit du papier homogène, mais l'erreur est de 5 0/0 environ.

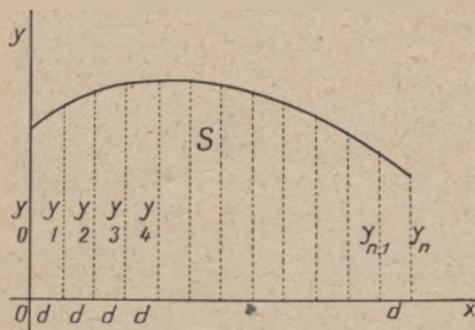


FIG. 207. — Aire d'une courbe (quadrature).

On peut enfin remarquer que l'aire de la courbe revient à la somme soit d'une série de petits rectangles égaux, comme nous l'avons vu plus haut, soit plus exactement d'une série de petits trapèzes. Dans ce cas, divisons la base ou

$$S = d \left[ 2 (y_1 + y_3 + \dots + y_{n-1}) + \frac{y_0 + y_n}{4} - \frac{y_1 + y_{n-1}}{4} \right],$$

ligne des abscisses OX en parties égales suffisamment petites  $d$  (fig. 207). La valeur approximative de  $S$  est celle que fournit la formule de Poncelet; on a :

c'est le produit de la distance  $d$  de deux ordonnées consécutives par le double de la somme des ordonnées impaires, augmentée du quart des ordonnées extrêmes et diminuée du quart des ordonnées immédiatement voisines des extrêmes.

Il n'y a donc pas à se soucier des ordonnées de rang pair. Et la limite supérieure de l'erreur est :

$$\frac{d}{4} (y_1 + y_{n-1} - y_0 - y_n).$$

L'application de la méthode de Poncelet est facile et donne de très bons résultats.

La planimétrie a été utilisée par Carrel pour évaluer l'aire d'une plaie qui se cicatrise<sup>(1)</sup>.

(1) Leconte du Noüy, *These sciences*, Paris, 1917.

**229. Ergométrie. Ergographie.** — L'ergométrie est l'ensemble des procédés pour mesurer le travail, comme l'ergographie est celui de les enregistrer. Dans les machines usuelles, on emploie généralement le frein de Prony (§ 41) ; dans le cas de l'homme agissant sur une manivelle, on pourrait centrer sur l'axe de la manivelle une poulie et transmettre le travail à un frein de Prony ; on pourrait faire de même si les muscles actionnent une pédale de bicyclette. Mais les résultats seraient inexacts. En effet, dans la machine inanimée, on équilibre le moment moteur, peu à peu, en serrant le frein, et ce moment a une valeur constante. Tandis que les muscles modifient leur puissance suivant la résistance à vaincre ; de sorte que cette puissance varie graduellement à mesure du serrage des écrous, et prend la valeur qui correspond au frottement à un instant donné. Une évaluation précise du travail humain, par un frein de Prony, est donc nécessairement difficile. Ce frein n'est d'ailleurs pas très sensible, et n'a presque jamais servi aux études de dynamique musculaire.

**230.** Les appareils ergographiques sont plus nombreux et plus avantageux que les appareils ergométriques <sup>(1)</sup>. Le général Morin en fit le premier une série d'applications, et, sur les conseils de Poncelet (vers 1839 ou 1840), il avait construit une machine dynamographique servant à mesurer le travail de traction des voitures.

Marey appliqua son système de transmission par l'air comme suit : Supposons le cas de soulèvement d'un fardeau par le moyen d'une corde passant sur une poulie ; on intercale sur le *brin moteur* que meuvent les muscles un dynamographe formé d'un piston P maintenu en équilibre entre deux ressorts à boudin, dont l'un, plus résistant, supporte l'effort exercé en A. La tige du piston se continue jusqu'à la membrane de caoutchouc qui ferme une caisse métallique C. Une forte monture de fer porte les anneaux A et B. La

(1) Voir plus loin, et aussi Zuntz (*Arch. f. Physiol.*, 1899, p. 375) ; Johanssohn (*Skänd. Arch. f. Physiol.*, t. XI, p. 273 ; 1901) ; — Blix (*ib.*, t. XV, p. 122 ; 1904).

résistance à déplacer agit en B; l'effort moteur s'exerce en A et soulève la membrane légèrement : ce qui produit un appel d'air et agit sur le tambour récepteur (fig. 208). Le tracé donnera la valeur en kilogrammes des efforts de traction ; la rotation de la poulie, par un système de réduction, sera transmise au cylindre enregistreur ; il en résultera que l'aire de la courbe décrite fournira le travail cherché. On réduit les parcours par des combinaisons d'engrenages ou de poulies de diamètres différents, appropriées aux circonstances. Marey vérifia que le travail est *plus grand* pour élever le fardeau que pour le descendre.

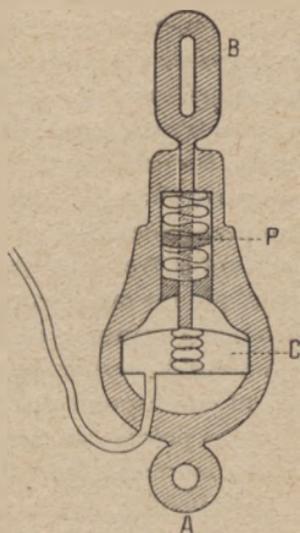


Fig. 208. — Dynamographe de Marey.

**231. Appareils ergométriques.** — Nous citerons le *frein à poids* de Laulanié <sup>(1)</sup> : dans la gorge d'une grande poulie s'enroule et frotte un ruban métallique qui reçoit à ses deux extrémités deux poids égaux P et P'. Le poids P est rattaché à un peson spécial p (fig. 209). Se penchant sur l'instrument, le sujet fait tourner la poulie à une vitesse constante. Le travail sera le produit du parcours  $2\pi rn$  ( $n$  = nombre de tours) par le frottement indiqué sur le cadran du peson. Ce sont ici les muscles des bras qui travaillent.

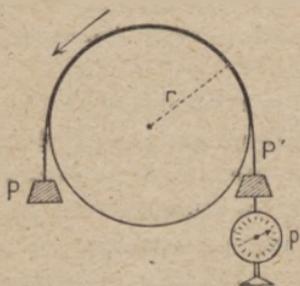


Fig. 209. — Frein à poids de Laulanié.

Les savants américains, Atwater et Benedict<sup>(2)</sup>, emploierent

(1) Laulanié (*Comptes Rendus Biologie*, 1903, p. 880).

(2) Atwater et Benedict (*Bulletin*, n° 136, p. 30 ; 1903 ; — n° 208, p. 11 ; 1909) et *Publication*, n° 167 ; 1912.

un *bicycle ergométrique* dont la disposition est telle que tout le frottement se convertit en chaleur dans une *chambre calorimétrique* et s'y trouve ainsi mesuré, en tant qu'énergie. L'appareil n'est donc pas utilisable indépendamment d'une installation de calorimétrie. Aussi renvoyons-nous au mémoire original le lecteur que cette technique intéresse (voir § 110).

On peut se servir plus simplement et correctement du *bicycle ergométrique* <sup>(1)</sup> suivant : on monte une bicyclette

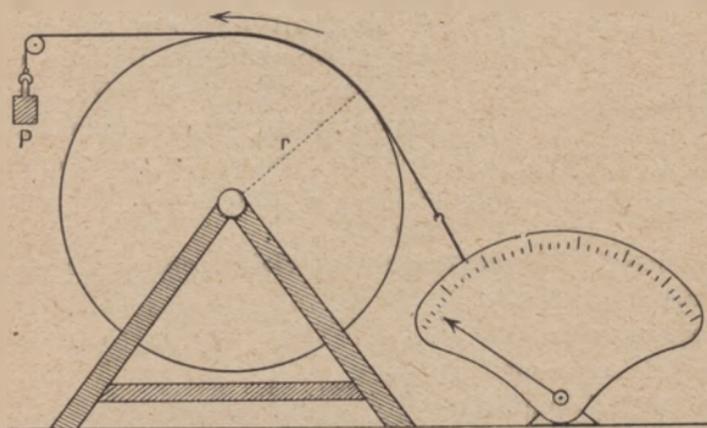


FIG. 210. — Schéma du bicycle à frein Amar.

sur un bâti solide (*fig. 210*), en ne conservant que sa seule roue d'arrière, alourdie et bien centrée pour faire office de volant. Dans la gorge de cette roue passe un ruban d'acier qui portera des poids à une de ses extrémités, et s'attachera, par l'autre extrémité, à un dynamomètre à cadran. Pour un poids  $P$  déterminé on lira, *au repos*,  $P$  sur le dynamomètre. Mais en marche normale, à une vitesse connue, on lira  $(P + p)$  grammes. La valeur  $p$  est relative au frottement. Le travail sera :

$$G = 2\pi rn \times p \text{ (voir aussi fig. 138).}$$

(1) Jules Amar (*Journ. de Physiol.*, 1912, p. 303). — Cf. *Le Rendement de la machine humaine*, p. 30, Paris, 1910.

On mesure ainsi le travail des muscles *des jambes*; mais on peut remplacer la pédale par une manivelle et faire travailler les *bras*, en plaçant tout le bâti à une hauteur convenable, ou en transmettant à l'axe de la manivelle le mouvement de l'axe pédalier, grâce à une chaîne (1).

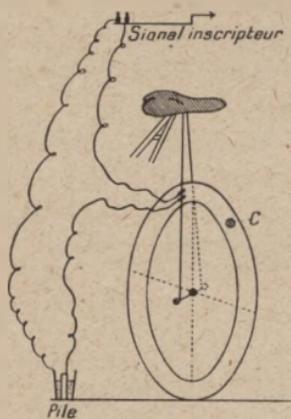


FIG. 211. — Enregistrement électrique de la vitesse de rotation d'une roue de bicyclette.

Le nombre des tours est relevé par *minute*. D'une façon plus exacte, on pourrait disposer un contact électrique entre la fourche et la roue, au point *c*, et inscrire, par des encoches sur papier enfumé, les tours de la roue; on intercalerait un signal Deprez dans le circuit (fig. 211).

D'autres modèles de freins sont clairement expliqués par les figures 212-213.

Indiquons, enfin, que le bicycle a été employé par M. Langlois sous l'aspect d'un frein de Prony qui absorbe tout le travail transmis à une poulie auxiliaire (2).

Nous avons déjà dit pourquoi cette disposition est défec-

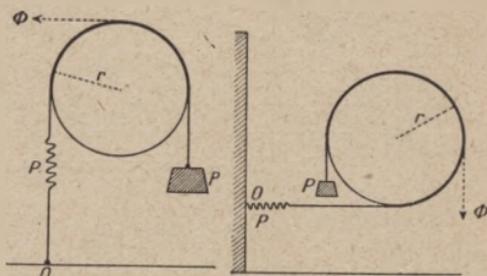


FIG. 212 et 213.

Le point *O* est fixe; *au repos*, le peson marque la valeur du poids *P* choisi supérieur à l'effort de frottement  $\Phi$ ; *en marche*, il indiquera  $P - \Phi$ . De là on déduit  $\Phi$ . Le travail par tour sera :  $2\pi r\Phi$ .

même beaucoup aux vitesses de 90 à 120 coups de pédale par minute (§ 229).

**232. Appareils ergographiques.** — Ce sont incontestablement les plus employés, parce que les plus pratiques et qu'ils sont corrects.

(1) Voir ce modèle très pratique dans *Organisation physiologique du travail*.

(2) Langlois (*Comptes Rendus Soc. Biol.*, 1910-1911).

L'ergographe classique est celui de Mosso<sup>(1)</sup>, physiologiste italien, qui lui donna ce nom. Il se compose de deux parties :

1° *Organe fixateur*. — Dans le modèle de Mosso, il s'agit d'enregistrer le travail des muscles fléchisseurs d'un doigt de la main ; celle-ci est alors appuyée, par le dos, sur un coussin A (fig. 214), tandis que l'index et l'annulaire sont introduits dans les tubes rigides G et N ; le dos de l'avant-bras pose sur la bague B. On serre ensuite un bracelet CD

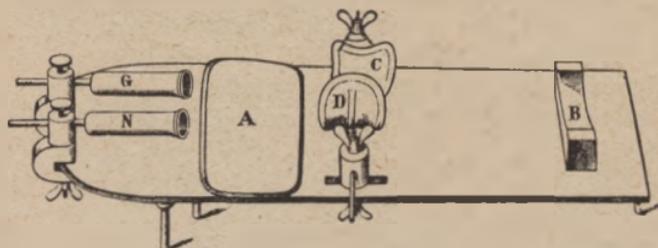


FIG. 214. — Organe fixateur de l'ergographe de Mosso.

autour du poignet, et parfois un second au milieu de l'avant-bras. L'ensemble est donc suffisamment fixe, mais le doigt du milieu (le médium) demeure libre.

2° *Chariot inscripteur*. — L'organe mobile est un chariot se déplaçant sur deux tringles N, N' et portant une plume PQ. A la base du chariot s'attachent, d'un côté, le cordonnet S qui se rend au doigt médium, de l'autre côté un cordonnet T passant dans l'axe d'une vis C et sur une poulie V, pour aller soutenir un poids P. La vis C permet de régler la position initiale du chariot pour que, au repos, le doigt ne subisse pas de traction (fig. 215).

Les deux parties de l'ergographe de Mosso sont montées solidement sur une table, et la poulie dépasse le petit bord de la table ; l'organe fixateur, parallèle à l'autre bord, est incliné, à droite, pour la main droite. Le doigt s'attache au fil S au moyen d'un anneau de cuir qui embrasse la deuxième phalange. On règle la position de la vis C, et on suspend un poids P, 3 kilogrammes par exemple, à l'extrémité du fil T. La plume est amenée au contact d'un cylindre enregistreur tournant lentement (fig. 216).

(1) Angelo Mosso (*Arch. ital. biol.*, 1890, t. XIII, p. 123). — *La Fatigue*, trad. française, 1894.

A chaque flexion du doigt, on enregistre une courbe dont

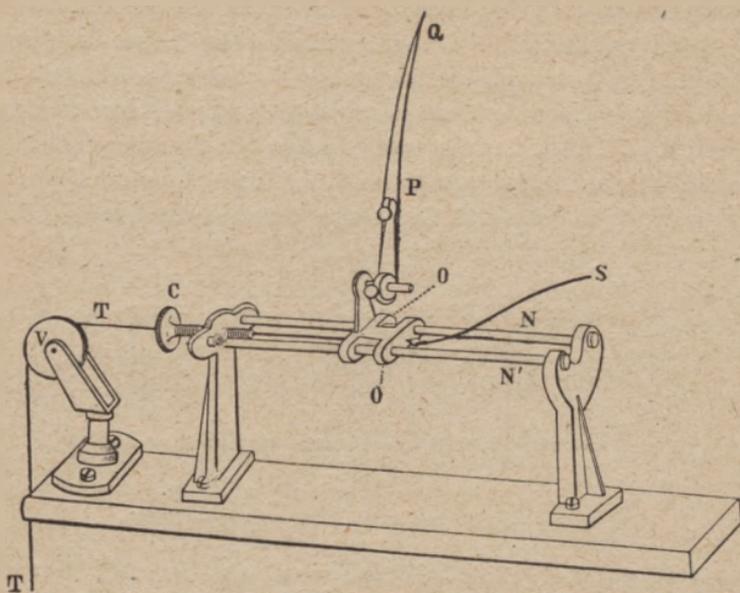


FIG. 215. — Chariot inscripteur de l'ergographe.

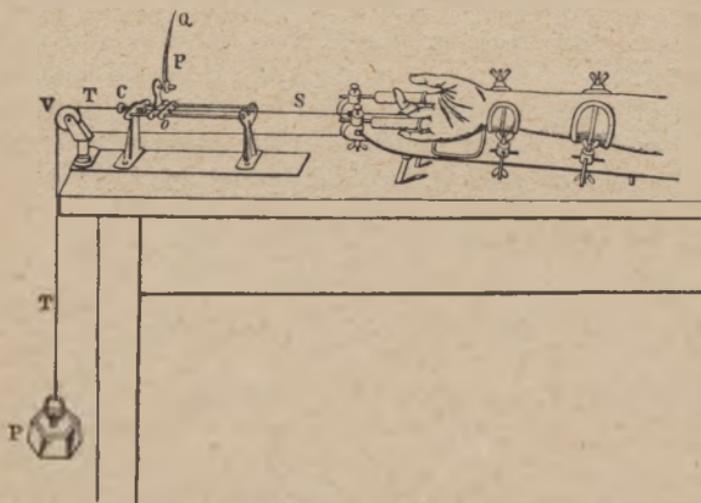


FIG. 216. — Ergographe entier de Mosso.

l'ordonnée exprime le déplacement  $l$  du poids  $P$  ; le travail est ainsi  $P \times l$  par contraction (*travail moteur*).

L'intensité des contractions va en diminuant par suite de la fatigue, et l'allure générale des courbes est *descendante*, surtout quand on précipite le rythme des mouvements. On donne le nom d'*ergogramme* à l'ensemble des contractions enregistrées jusqu'à la fatigue. La figure 144 (p. 291) représente quelques ergogrammes.

### 233. Ergographes divers (d'après le principe de Mosso).

— Le nombre des ergographes ayant le même principe que celui de Mosso est considérable. La plupart des auteurs ont

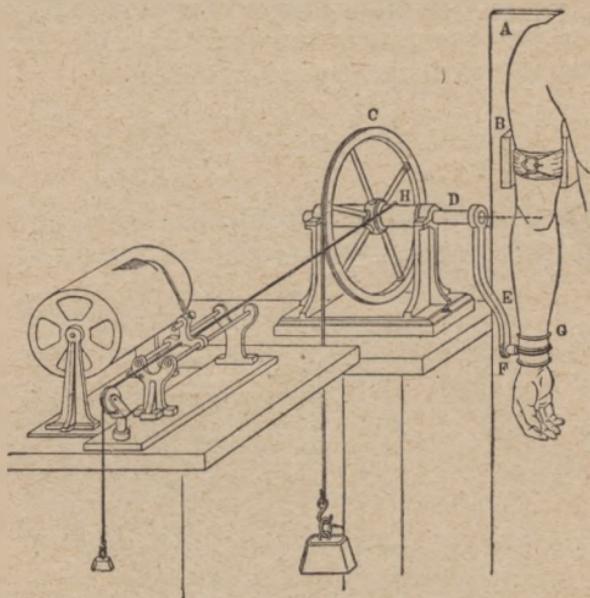


FIG. 217. — Ergographe brachial de Trèves.

utilisé le travail du doigt médian <sup>(1)</sup>, sauf Storey <sup>(2)</sup> qui, remarquant la gêne de ce doigt quand les autres sont immobilisés par l'appareil, fit travailler l'*index* : c'est certainement plus normal.

(1) Lombard (*Journ. of physiol.*, t. XIII, p. 4-38, 1892); Pantanetti, *Arch. ital. biol.*, t. XXII, p. 17; 1893); Trèves (*ibid.*, t. XXXVI, p. 4+, 1904); Binet et Vaschide (*Année psychol.*, 1898, p. 303); Grandis (*Arch. sc. med.*, t. XXVI, p. 269; 1902).

(2) Storey (*Amer. Journ. of physiol.*, t. VIII, p. 355; 1903; imaginé dès 1900).

Trèves imagina un *ergographe brachial* <sup>(1)</sup>, figuré ci-dessus (fig. 217) : le sujet s'appuie contre un plan vertical A, tandis que son bras droit est fixé dans une gouttière B au moyen d'un ruban. Un bracelet G rattache l'avant-bras à la manivelle E d'une roue C, dont l'axe est sur le prolongement de l'axe transversal de l'articulation du coude. Le poids P à soulever est suspendu à un cordon qui embrasse la gorge de la roue C. Enfin, du moyeu H de celle-ci se détache un fil se rendant au chariot inscripteur.

Pour obtenir la valeur du travail, il faut tenir compte des rayons R de la manivelle, r de la roue et r' du moyeu. Si h est l'ordonnée d'une courbe due à la flexion de l'avant-bras sur le bras, le travail correspondant sera :

$$\mathfrak{C} = P \times h \times \frac{r}{R} \times \frac{r}{r'} = \frac{Phr^2}{Rr'}$$

234. Citons aussi la modification de l'appareil de Mosso pour en faire un *ergographe des jambes* ; elle est due à Capobianco <sup>(2)</sup> (fig. 218).

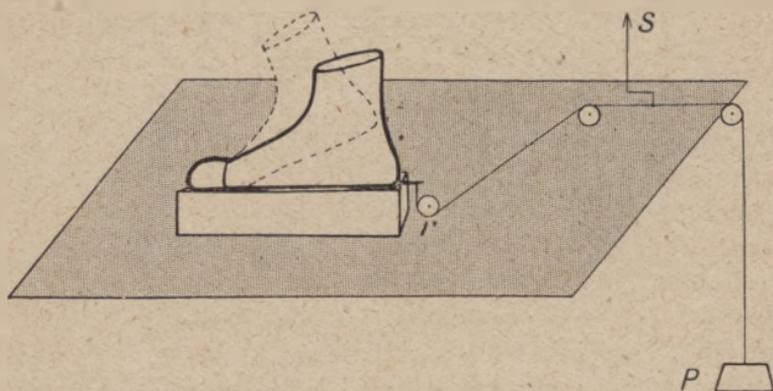


Fig. 218. — Ergographe jambier de Capobianco.

L'organe fixateur est un soulier en toile fine et résistante, muni d'une semelle rigide (bois ou fer). Celle-ci est fixée sur un support de quelques centimètres, et porte un éperon auquel vient s'attacher une corde de boyau passant sur une

<sup>(1)</sup> Trèves (*Arch. sc. med.*, t. XXII, p. 373 ; 1898).

<sup>(2)</sup> F. Capobianco (*Arch. ital. biol.*, t. XXXVII, p. 123, 1901 ; et surtout le *Monitore zoologico ital.*, n° 7 ; 1901).

poulie  $r$  au-dessus du niveau du support. D'autre part, la corde rejoint le chariot habituel de Mosso, avec son style  $S$  et le poids à soulever  $P$ . Le sujet s'assied sur une chaise, la cuisse serrée dans une courroie pour n'avoir pas à intervenir, et la jambe un peu fléchie; il soulève le talon tandis que la pointe du pied reste fixée à une charnière; sous un poids de 20 kilogrammes, le triceps crural qui se contracte subit rapidement la fatigue; les ergogrammes obtenus sont très analogues à ceux du doigt médus.

Nous avons indiqué et employé avantageusement un ergographe qui permet de faire travailler les doigts ou le poignet, en les isolant parfaitement. Notre *Chirographe* <sup>(1)</sup>, — c'est son nom, — sert tout spécialement en mécanothérapie et à divers usages spécifiés dans *Organisation physiologique*. Grâce à cet appareil, on arrive à exercer tous les doigts aux mouvements vites et réguliers.

La technique ergographique demande une grande attention pour éviter les associations musculaires et la douleur <sup>(2)</sup>.

**235. Mesure du travail professionnel.** — Les ergographes out pour principal objet de fournir la loi de décroissance du travail sous l'influence de la fatigue.

La méthode graphique de Marey a seule permis de mesurer le travail des muscles appliqués à la manœuvre de tel ou tel outil professionnel. Les dispositions décrites pour mesurer la grandeur des efforts conviennent aussi à l'évaluation du travail.

Prenons les différents cas déjà mentionnés (§ 217 et suiv.) et distinguons soigneusement le *travail utile* de l'instrument d'une part, du *travail musculaire* de l'autre. Par exemple, le travail utile du cabrouet, de la brouette, d'un véhicule quelconque, est le produit des frottements par la distance parcourue. Nous savons mesurer l'effort dû aux frottements  $F$ ; nous mesurerons le parcours  $L$ . D'où :

$$\bar{C} = F \times L.$$

(1) J. Amar (*Journal de Physiol.*, sept. 1915).

(2) Consulter Holmes (*Journ. of amer. med. assoc.*, décembre 1903) et Hellsten (*Skand. Arch. f. physiol.*, t. XVI, p. 139 : 1904).

Or, c'est la composante horizontale de l'effort musculaire qui a pour valeur  $F$  ; si elle est une fraction  $m$  de cet effort total, nous pourrions dire que les muscles font une dépense de force  $m \times F \times t$  dans le temps  $t$  que dure le travail.

La figure schématique 219 donne un exemple du mode de décomposition de l'effort exercé sur l'outil.

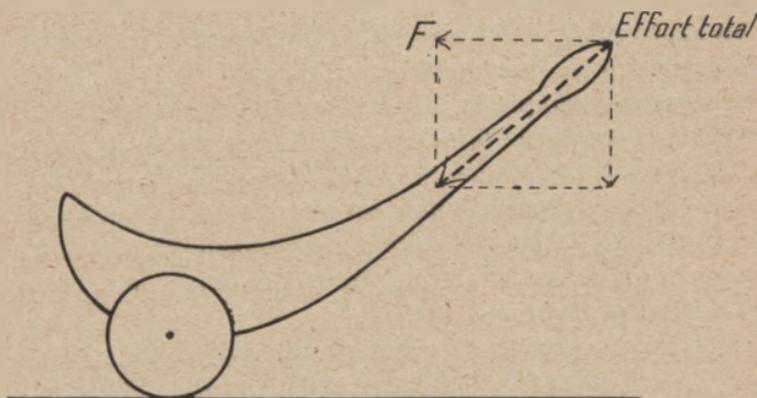


FIG. 219. — Décomposition de l'effort de poussage au cabrouet.

Le maintien des manches à une certaine hauteur constitue un travail  $\mathcal{C} = F \times l$  ; dans le temps  $t$ , la dépense de forces musculaires est donnée par la règle du parallélogramme :

$$\sqrt{F^2 + F'^2} \times t.$$

236. La mesure du *travail du sécateur* a été faite par Imbert en cherchant la *hauteur de chute* d'un poids capable d'opérer la section du sarment considéré. A cet effet, le sécateur est disposé comme pour la mesure de l'effort de coupage (fig. 195) ; on suspend, au milieu de SN, un fil flexible et résistant terminé par un crochet, lequel recevra le poids, et on fait tomber celui-ci le long d'une règle verticale donnant la hauteur de chute.

Soient  $P$  le poids et  $h$  la hauteur ; le travail de coupage sera :

$$\mathcal{C} = Ph.$$

Il est important de se rappeler que ce travail varie suivant la position du sarment par rapport à l'articulation du sécateur, et suivant l'épaisseur à traverser.

237. Soit encore le cas du *travail à la lime*. L'ouvrier appuie pour la faire mordre, mais le travail est le produit du parcours de la lime par la somme des efforts horizontaux de la main droite et de la main gauche, lesquels surmontent la résistance du métal. Si la valeur de ces efforts est  $F$ , et si la longueur utilisée de la lime est  $l$ , le travail par coup de lime sera :

$$C = Fl.$$

Il n'est pas nécessaire d'ajouter que le même principe régit l'évaluation du travail au rabot, à la scie, etc. Quelque grands que soient les efforts statiques des muscles, ils ne sauraient figurer dans le travail utile proprement dit.

238. **Classification du travail de l'homme.** — A ne considérer que le travail mécanique, une classification pourrait avoir pour fondement le groupe des muscles actifs, suivant que ce sont les muscles des *bras*, des *jambes*, des *doigts* ou plusieurs groupes à la fois, ou enfin que l'on utilise le *poids total du corps*.

Les travaux des bras ou *manuels* sont les plus variés ; ils sont employés à *pousser* ou à *tirer*, soit directement, soit par l'intermédiaire de leviers, manivelles, cordes et poulies ; et ils emploient ou ils mettent en action de nombreux outils et appareils :

Lime, scie, rabot, sécateur, cisailles, ciseaux, qui sont des leviers du premier genre, ayant par conséquent le point d'appui à l'articulation ; l'exemple du sécateur nous a montré le procédé qui convient pour mesurer l'effort de la main et son travail ;

Brimbales (ou bringuebales) des pompes ; avirons des bateaux, grands couteaux à pain ou à légumes, casse-noisettes constituent des leviers du deuxième genre. L'effort peut être mesuré en appliquant sur le bras de levier, au point même où agira la puissance, une lame d'acier recouvrant une petite poire en caoutchouc ; les variations de pression de l'air seront transmises à un tambour récepteur ; c'est le système adopté pour mesurer l'effort vertical de la main gauche agissant sur la lime (*fig. 190*). Dans le cas des avi-

rons, on sait que la palme prend son point d'appui sur l'eau, l'effort du rameur est la puissance, et le bateau qu'il fait avancer constitue la résistance. L'expérimentation est non moins facile que précédemment, à la condition de saisir les avirons toujours aux points où le système de transmission et d'exploration de l'effort a été appliqué; le cylindre enregistreur pourra être placé sur le bateau en le tenant convenablement, comme on tient en marchant l'enregistreur de Marey (fig. 185). La graduation consisterait à tirer sur les avirons au moyen de dynamomètres médicaux pourvus d'une échelle;

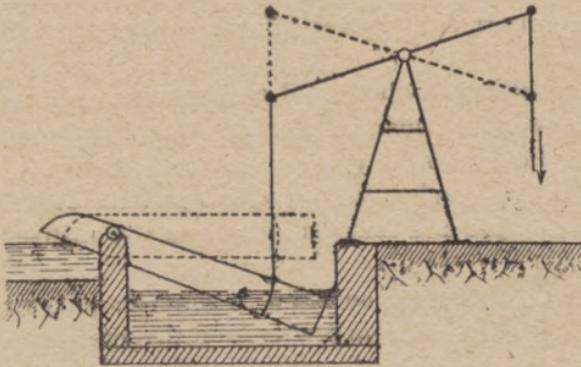


Fig. 220 — Baquetage (écope hollandaise).

*Sonnettes*, à l'aide desquelles on soulève d'abord une masse très lourde, appelée *mouton*, pour la laisser tomber d'une certaine hauteur sur un pieu à enfoncer dans le sol. Dans la sonnette à *tiraudes*, chaque ouvrier tire sur un cordon; s'il y a  $n$  ouvriers pour un poids  $P$  du mouton, chacun d'eux supporte en moyenne un poids  $\frac{P}{n}$ . Mais, en intercalant des pesons robustes, ou mieux le dynamographe de Marey, dans le cordon, sectionné convenablement, on mesurera à tout instant l'effort exercé par l'ouvrier; l'inclinaison du brin moteur sur la verticale modifie la valeur de cet effort.

Connaissant la hauteur à laquelle le mouton a été soulevé, on aura le travail par coup de sonnette. Il est aisé de savoir ce qu'un homme fait de coups de sonnette dans sa journée (nombre de *volées*).

Dans le *baquetage*, pour épuiser l'eau à bras d'hommes, on connaît la hauteur à laquelle l'eau sera élevée, et la profondeur du puits: on intercalera un dynamographe sur la corde qui s'attache au seau pour mesurer l'effort. Si l'on agit par l'intermédiaire d'un levier, comme dans certains modes de puisage, on calculera le travail d'après le déplacement du bras de la puissance, qui est connue (*fig. 220*).

239. L'action des muscles des bras peut s'exercer sur des *treuils*, soit par l'intermédiaire d'une corde enroulée sur une poulie-tambour, soit au moyen d'une manivelle BA (treuil de puits), montée à l'extrémité de l'arbre BC du treuil (*fig. 91*, p. 102). L'effort sera mesuré en interposant un peson ou un dynamographe sur la corde, comme en appliquant à la manivelle un ressort avec une poire de caoutchouc.

Soit  $F$  la puissance exercée par l'ouvrier; le bras de levier par rapport à l'axe du treuil est  $BB'$ ; désignons-le par  $r$ . Il est évident que le travail par tour a pour expression :

$$\mathcal{U} = 2\pi r \times F.$$

L'effort  $F$  agit tangentiellement au tambour, dans le premier cas, et à la circonférence décrite par la manivelle, dans le second cas.

Le travail ainsi évalué comprend celui des frottements des tourillons du treuil et de la raideur de la corde qui est enroulée sur le cylindre.

On procédera de la même manière pour calculer le travail et mesurer la puissance quand il s'agit du *cabestan*; c'est, en effet, un treuil à axe vertical. Un homme *virant* au cabestan exercera sur l'une des barres un effort  $F$ ; soit  $l$  la longueur de la barre; son travail est  $2\pi l \times F$  par tour entier. Plusieurs barres sont ainsi implantées dans la *tête* de l'appareil et, sous l'effort de plusieurs hommes, permettent d'enrouler le câble qui porte l'ancre du navire.

La *sonnette à declic* remplace souvent la sonnette à tiraudes; la puissance agit par l'intermédiaire d'un treuil à engrenages, ce qui en multiplie la valeur; la corde qui sou-

tient le mouton s'enroule sur le treuil; et quand le mouton a atteint la hauteur voulue, il échappe automatiquement et tombe sur le pieu à enfoncer.

Dans le *cric*, par lequel on soulève à petite hauteur de lourds fardeaux, la puissance s'exerce sur une manivelle.

Enfin, dans le *balancier à frapper les monnaies*, elle s'exerce sur un levier horizontal commandant le mouvement d'une vis. Aucune de ces manœuvres ne présente de complications quant à la mesure de l'effort et du travail musculaire (voir livre VI).

240. Les *soufflets de forges* offrent encore plus de simplicité à cet égard, vu le mode suivant lequel on doit les manœuvrer : un dynamographe donnera l'effort exercé sur la corde de manœuvre, et un arrêt limitera la course de cette corde pour que l'on puisse évaluer le travail.

Divers outils, maniés à la main, tels que pinces, tournevis, tarières, burins, vilebrequins, clefs d'écrous, planes, tenailles, archets de musique, archets de forge, etc., ou bien n'exigent pas d'efforts considérables, ou bien, sont d'un usage rarement continu. Il serait, cependant, intéressant, de les munir de ressorts dynamographiques pour avoir une idée de l'effort que chacun d'eux nécessite. Pour l'archet du violoniste, en particulier, cet effort est petit; mais il est continu, rapide : l'enregistrement, au moyen d'un dynamographe placé dans la poignée, devra donc indiquer aussi la *vitesse* du mouvement de l'archet.

Le *marteau* et le *maillet* sont d'une manœuvre parfois fatigante (forgerons, charrons). Ils sont, dans la plupart des cas, fabriqués de telle façon qu'au moment de la *percussion* il n'y ait pas de réaction sensible sur la main (§ 43). Le travail utile du marteau se calcule assez facilement, d'après la vitesse. On aura :

$$E = \frac{1}{2} Mv^2$$

à chaque coup. La force du coup est :  $Mv = Ft$ . Si on enregistre électriquement  $t$  (§ 43), on pourra évaluer  $F$ .

On a, d'ailleurs, sectionné le manche et rendu le marteau

dynamographique, pour mesurer directement les efforts musculaires (1).

Dans les travaux de terrassements, maçonnerie, culture, les outils consistent en marteaux, *pioches*, *pelles*, *beches*. La mesure du travail exige la connaissance du poids déplacé (outil et sa charge : mortier, pelletée) ainsi que de la hauteur à laquelle on le porte. L'effet strictement utile ne tiendra compte que de l'ouvrage : terre enlevée, mortier employé, etc.

Pour enfoncer une pioche ou une bêche en terre, il faut vaincre une certaine résistance : dans ce but, il sera nécessaire de sectionner le manche et d'y adapter un dynamographe approprié pour connaître l'effort dépensé, absolument comme plus haut (§ 218).

Dans quelques cas, enfin, il faut exécuter un mouvement de rotation, dans un sens ou dans l'autre. Le *Gyrographe* (2) fournit l'effort et l'amplitude ; mais c'est encore, comme le chirographe, un appareil de mécanothérapie, servant ici à exercer la main.

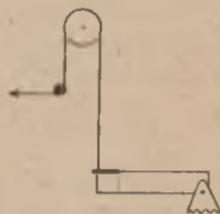


FIG. 221.  
Touche de piano.

**241. Exercice des doigts.** — Il s'agit de travaux de vitesse : instrumentistes-musiciens, écrivains (au sens manuel de ce mot), dactylographes, couturières, brodeuses, etc. Quand les doigts doivent actionner des *touches* (fig. 221), celles-ci pourront recevoir de petits tambours de Marey qui indiqueront les pressions subies. De plus, au moyen d'un fil et d'un léger contrepoids, on enregistre le déplacement : d'où le travail. Marey lui-même procéda comme suit : « Au-dessous de chaque touche du clavier d'un harmonium, on avait disposé de petits soufflets à air, dont chacun, relié par un tube spécial avec un petit soufflet semblable, commandait un style inscripteur » (3). On obtenait ainsi le tracé des notes jouées, avec leurs durées représentées par des traits plus

(1) Frémont, *Étude du rivetage*, Paris, 1906.

(2) Jules Amar (*C. R. Acad. Sc.*, 11 décembre 1916).

(3) Marey, *le Mouvement*, p. 12 ; 1894.

ou moins longs. Nous employons, dans ce même but, un *dé à ressort* (voir § 350).

En réalité, ces mesures n'offrent que bien peu d'intérêt; le véritable facteur à considérer dans ce genre de fatigue est la *vitesse* des mouvements.

**242. Travail des muscles des jambes.** — Ce sont, à coup sûr, les muscles les plus puissants; leur rythme normal et leur fatigue peuvent s'étudier au moyen de l'ergographe de Capobianco; leur travail sur bicyclettes, vélocipèdes, sur pédales (de remouleur, par exemple) s'évalue aisément (§ 231), surtout si on interpose au pied et à la pédale un tambour de Marey avec ressort intérieur, une chaussure exploratrice (§ 220).

Dans le cas des bicyclettes, on a fait usage de dynamographes spéciaux, tels que le *Cyclographe* de Scott ou la *Pédale dynamométrique* de Marey (1). Soit  $F$  la pression uniforme alternative sur chaque pédale; si  $d$  est le diamètre du cercle de la pédale, le travail sera  $F \times d$  par coup de pédale et l'on a approximativement :

$$\mathcal{C} = 2Fd.$$

C'est le travail effectué par les jambes, et c'est aussi le travail de roulement de la bicyclette chargée. Il est clair que, par coup de pédale, la bicyclette avance de tout son développement  $D$ ; si  $R$  est l'ensemble des résistances qu'elle doit vaincre (résistance au roulement, résistances passives des billes et des transmissions, résistance de l'air), on a :

$$R \times D = \mathcal{C} = 2Fd.$$

De sorte que, connaissant  $\mathcal{C}$  ou  $R$ , on en déduira la valeur de la pression moyenne  $F$  sur les pédales.

Nous pouvons exprimer  $R$  par la relation, très suffisante en pratique :

$$R = 0,012P + 0,073SV^2,$$

$P$  étant le poids total de la bicyclette et du cavalier,  $S$  la surface de ce dernier, environ  $0^{\text{m}^2},60$ , et  $V$  la vitesse en mètres, sur une route en palier.

(1) Voir Bouny (*Comptes Rendus Sciences*, 15 juin 1896).

Si la route est inclinée de  $i$  par mètre, on aura :

$$R = P(0,012 \pm i) + 0,073SV^2,$$

suivant qu'il s'agit d'une rampe ou d'une pente.

EXEMPLE. — On s'élève à 18 kilomètres à l'heure sur une rampe de  $i = 0^m,02$ ; la bicyclette pèse 15 kilogrammes et l'homme 65 kilogrammes.

On a :

$$P = 65 + 15 = 80 \text{ kilogrammes.}$$

$$V = \frac{18.000}{3.600} = 5 \text{ mètres.}$$

Donc :

$$R = 80 \times 0,032 + 0,073 \times 0,6 \times 5 \times 5 = 3,655 \text{ kilogrammes.}$$

Le travail sera :

Par heure :

$$3,655 \times 18.000 = 65.790 \text{ kilogrammètres.}$$

Par mètre :

$$\frac{65.790}{18.000} = 3,655 \text{ kilogrammètres.}$$

Dans la descente, la valeur de  $R$  sera :

$$R = 80 \times (-0,008) + 0,073 \times 0,6 \times 5 \times 5 = 0,455 \text{ kilogrammes.}$$

Bien entendu, la nature du terrain, l'état des pneus modifient les valeurs précédentes.

Les jambes ont pour travail ordinaire celui de la *locomotion* (voir plus loin, § 279), et alors elles supportent le poids du corps humain avec des variations tenant au mode du mouvement; elles ont souvent à résister, en outre, au port des fardeaux, à déplacer ce poids total sur un terrain *en palier* (horizontal) ou *en pente*. Le travail utile, c'est évidemment le produit du poids déplacé par la somme des amplitudes d'oscillation verticale du corps dans la marche en palier, ou par cette somme augmentée de la pente totale que l'on a gravie. Mais le parcours horizontal modifie tellement la

dépense d'énergie, pour un même travail mécanique, que l'on aurait avantage à considérer, avec Coulomb, une unité autre que le kilogrammètre, et qui serait le produit de 1 kilogramme du poids déplacé par mètre parcouru, horizontalement. Nous l'appellerons *mètre-kilogramme* (symbole : Mkg).

Quand il ne s'agit que d'élever le poids à une hauteur  $H$ , le travail sera  $P \times h$ , car le sujet élève réellement son poids, exerce un effort  $P$  dans le sens du déplacement  $H$ .

S'il s'élève sur une échelle,  $H$  sera la distance *verticale* par rapport au sol, et non pas la longueur de l'échelle.

Mais, suivant la *vitesse* d'ascension, le sujet dépensera un effort plus grand que  $P$  ; de sorte que le *travail musculaire* est *supérieur* au travail mécanique.

Lorsqu'un homme *descend* d'une hauteur  $H$ , son travail mécanique, c'est-à-dire celui dont il est l'objet de la part de la pesanteur, est également  $PH$  en valeur absolue. Mais le travail musculaire, suivant que la descente résiste plus ou moins à la pesanteur, est plus ou moins *voisin* de la valeur  $PH$  ; l'effort est *inférieur* à  $P$ .

**243. Autres travaux des jambes.** — On utilise l'ascension de l'homme sur un *treuil de carriers* (fig. 222) pour extraire les pierres. C'est une roue portant à sa circonférence des échelons perpendiculaires à son plan. Le long de ces échelons l'ouvrier grimpe et agit ainsi par son poids à l'extré-



FIG. 222. — Roue à chevilles ou treuil des carriers.

mité d'un grand rayon  $R$  ; son travail par tour est :

$$\bar{C} = 2\pi R \times P.$$

L'ascension est dans ce cas *virtuelle*, le sujet ne montant pas effectivement.

Dans la *machine à coudre*, les *tours à pédale*, la *meule du rémouleur*, qui constituent des leviers du troisième genre, la chaussure exploratrice donnera la valeur de l'effort, car cet effort varie suivant la dureté de la matière à ouvrager, la pression de l'outil à aiguiser, etc.

**244. Complexité du travail professionnel.** — L'analyse des procédés de mesure nous a obligé à une classification par groupes musculaires actifs. En fait l'ouvrier met en action ses bras en même temps que ses jambes dans beaucoup de professions.

Dans les sports, il en est toujours ainsi: *gymnastique*, *escrime*, *boxe*, etc. Le caractère sportif de ces exercices ne cadre pas avec ceux que nous étudions. Disons seulement que la *vitesse* des mouvements est leur loi, bien plus que la grandeur de l'effort.

L'usage de la *parole* en public comporte un travail assez important, qui atteint des valeurs élevées chez l'orateur, l'acteur, le chanteur.

Le *travail de la parole* a été mesuré par M. Marage <sup>(1)</sup> d'après le volume d'air  $V$  expulsé par les poumons et sa pression  $H$  dans la trachée; il s'exprime par le produit  $VH$ . Mais cette évaluation est relative à une fraction du travail effectif de l'orateur, et tout ce qui est énergie musculaire en est exclu. Le travail total semble devoir échapper à toute détermination expérimentale.

**245. Puissance de l'homme.** — Elle s'évalue, dans les cas de travail continu, ou pour une période de temps  $t$ , en divisant le travail par sa durée exprimée en secondes. C'est la *vitesse du travail*. Une organisation scientifique du travail doit tendre à ce que la puissance de l'homme soit à peu près constante à chaque période, et ne se déprime pas sous l'effet d'une fatigue très rapide, tenant à de mauvaises conditions mécaniques ou physiologiques.

(1) Marage (*Journal de Physique*, 1908, p. 298).

## CHAPITRE III

### LES MESURES : ÉVALUATIONS ÉNERGÉTIQUES

246. **Généralités.** — Les énergies que l'on est appelé à évaluer dans l'étude de la machine humaine sont ou bien celles qui se manifestent au dehors sous les formes de chaleur et de travail; ou bien celles qui agissent du dehors sur l'organisme.

Les premières sont l'expression du « travail physiologique » ou encore de l'énergie *physiologique*. Les secondes sont dues aux actions naturelles et météoriques. Et celles-ci réagissent sur celles-là; de sorte que la mesure de l'énergie physiologique, c'est-à-dire de la *depense* du moteur humain, concerne exactement la résultante de ses fonctions, au moment considéré. En outre, elle indique la quantité d'énergie que nécessite un certain travail, une certaine forme d'activité dont l'évaluation mécanique ne serait pas possible.

Aussi commencerons-nous par ce genre de mesures.

247. **Mesure de l'énergie physiologique.** — Il y a deux méthodes : celle de la ration d'entretien et celle de la consommation d'oxygène (§ 106).

A) *Méthode des rations d'entretien.* — Le sujet que l'on soumet à cette épreuve suit son régime alimentaire habituel. On note approximativement la *quantité* et la *qualité* des aliments consommés. Puis, en tâtonnant, on lui fixe une *ration* telle que tous les jours, à la même heure, le poids du sujet ne se modifie pas sensiblement. De préférence cette heure sera celle du *matin, au lever*.

En outre, si la ration concerne un entretien dynamique, le travail journalier devra être *constant*, aussi identique que possible et, mieux, s'effectuer à la même période du jour.

« Dès que le sujet entre dans la période de travail, il peut arriver que la ration, donnée au hasard, lui conserve son poids le *lendemain même*. Ce serait une erreur de s'y arrêter. Nous avons toujours constaté que cette ration ne le maintiendra plus le surlendemain. Il faut l'accroître légèrement. Par contre, sept à huit jours d'un même travail diminuent la ration d'entretien. Ces variations sont faibles, témoin cet exemple :

|                                      |                       |
|--------------------------------------|-----------------------|
| Poids du sujet au repos.....         | 80 <sup>kg</sup> ,200 |
| 1 <sup>er</sup> jour de travail..... | 80 ,200               |
| 2 <sup>e</sup> — .....               | 79 ,980               |
| 3 <sup>e</sup> — .....               | 80 ,100               |
| 4 <sup>e</sup> — .....               | 80 ,180               |
| 5 <sup>e</sup> — .....               | 80 ,200               |
| 6 <sup>e</sup> — .....               | 80 ,200               |
| 7 <sup>e</sup> — .....               | 80 ,200               |
| 8 <sup>e</sup> — .....               | 80 ,280               |
| 9 <sup>e</sup> — .....               | 80 ,300               |

« Nous adoptions le nombre du septième jour ; mais, souvent, la constance du poids se réalisait dès le troisième jour avec suite !. »

Les rations d'entretien sont évaluées en grandes calories.

Les conditions précédentes s'appliquent à des recherches de laboratoire. Mais, ordinairement, l'homme vaque à ses occupations ; son travail n'est pas constant, et les évaluations énergétiques n'ont plus de rigueur.

Généralement, on fait alors usage d'enquêtes sur les rations moyennes des ouvriers, par âge et par profession, et suivant les sexes. Voici, à titre d'exemple, de quelle manière l'Institut Solvay (2) a organisé ses enquêtes : On s'adresse, par l'intermédiaire de personnes de confiance, à des ménages d'ouvriers, ni trop pauvres, ni trop aisés, et l'on comprend dans le ménage tous ceux qui, normalement, font leurs repas ensemble. Les renseignements se rapportent à une

(1) Jules Amar, *le Rendement...* (*loc. cit.*, p. 45-46).

(2) Slosse et Waxweiler : *Enquête sur le régime alimentaire* fasc. 9 ; Bruxelles, 1910, p. 14.

période de quinze jours : les uns sont fournis par le *carnet-inventaire*, remis au délégué surveillant ; les autres, par le *livret de consommation* tenu régulièrement par la ménagère, la femme de l'ouvrier chef du ménage. L'enquête achevée, on détermine, d'après les tables (§103), les quantités de protéiques, de graisses et d'hydrates de carbone, et les valeurs énergétiques correspondantes. Enfin, pour tenir compte de l'âge et du sexe, on fait usage des *coefficients d'âge* suivants d'Atwater (1) :

|   |      |
|---|------|
| La consommation d'un <i>homme</i> adulte étant. | 1,00 |
| Celle d'une <i>femme</i> sera.....              | 0,80 |
| Garçon de 14-16 ans.....                        | 0,80 |
| Fille de 14-16 ans.....                         | 0,70 |
| Enfant de 10 à 13 ans.....                      | 0,60 |
| — 6 à 9 —.....                                  | 0,50 |
| — 2 à 5 —.....                                  | 0,40 |
| — au-dessous de 2 ans.....                      | 0,30 |

On pouvait donc évaluer la dépense énergétique moyenne de l'homme, dans une profession connue.

Ce genre d'enquêtes manque évidemment d'exactitude.

248. B) *Méthode de l'oxygène*. — Cette méthode présente le double avantage d'être plus *commode* et plus *précise* que l'autre. En effet elle convient à la mesure de la dépense énergétique sur des sujets en « régime libre », et elle peut porter sur une durée très faible, de quelques minutes par exemple.

Nous en connaissons déjà le principe. Il s'agit de déterminer la consommation d'oxygène, au repos et au travail, d'un homme, supposé placé dans un milieu à température donnée. Pour écarter toutes causes d'incertitude, il serait bon d'opérer le matin, après le jeûne de la nuit (environ dix heures).

Le pouvoir comburant du litre d'oxygène, à 0° et 760, sera 4<sup>Cal</sup>,6 (§117). On pourrait aussi donner une certaine quantité d'hydrates de carbone (sucreries) au sujet et ne commencer

(1) Atwater, (*Bull.* n° 142, p. 33 ; 1903). — Engel a donné les mêmes coefficients (*Bulletin Société internat. statist.*, t. IX, p. 5, 1895).

les déterminations que *deux heures après*. Dans ce cas, le pouvoir comburant sera voisin de 5 Calories (§ 107). Si, enfin, le sujet s'alimente à sa façon et qu'il ne soit pas possible de le soumettre à un régime connu, on se guidera d'après le *quotient respiratoire* (§ 107) : le pouvoir comburant est alors  $4\text{Ca}_1,90$  généralement.

L'expérience devra, de toutes façons, durer *dix minutes au moins*, pour que le régime respiratoire s'établisse normalement.

**249. Mesurage des échanges respiratoires.** — On adap-

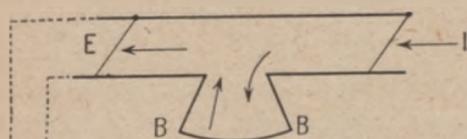


FIG. 223. — Soupape respiratoire de Chauveau.

tera à la bouche du sujet la *soupape buccale* de Chauveau, dont les valves joignent à l'étanchéité une mobilité remarquable. A l'inspiration, l'air extérieur ouvre la valve I et se rend aux poumons; à l'expiration, les gaz trouvent I fermée et se di-

rigent vers la valve E ; un tuyau de caoutchouc les conduira au compteur (fig. 223 et 224). On peut pratiquer une dérivation sur la soupape, et faire agir les pressions de l'air

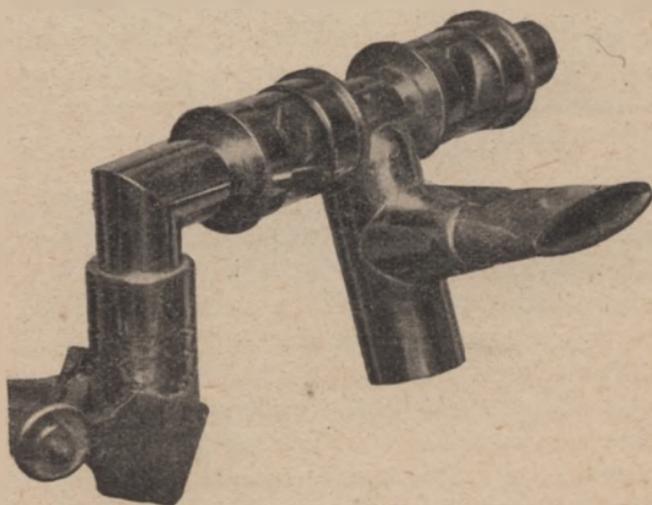


FIG. 224. — Soupape respiratoire de Chauveau

rigent vers la valve E ; un tuyau de caoutchouc les conduira au compteur (fig. 223 et 224). On peut pratiquer une dérivation sur la soupape, et faire agir les pressions de l'air

respiré sur un tambour inscripteur. On aura ainsi des *tonogrammes*, plus fidèles que les pneumogrammes (voir § 149).

La partie de la soupape qui s'adapte à la bouche B porte une rondelle de caoutchouc qui vient s'appliquer contre les dents, sous les lèvres, et supprime toutes fuites. Le nez est serré par une petite pince en bois (pince des lingères) dont les mors sont recouverts de feutre. La dérivation peut consister en un petit tube placé dans l'axe du bouchon de fermeture inférieure, et conjugué avec un tambour inscripteur.

Avant l'expérience, on essuie bien les pièces qui composent la soupape, afin d'éviter l'adhérence des valves contre les rebords; du reste, ces rebords sont tranchants en vue de diminuer leur adhérence.

Quant à l'air extérieur que le sujet devra inspirer, ce sera de l'air pur répondant à la composition de 21 0/0 d'*oxygène* et 79 0/0 d'*azote*, en volumes. On se placera donc au milieu d'une vaste salle parfaitement aérée, ou mieux on fera usage d'une canalisation de verre ou de caoutchouc qui amènera l'air du dehors, pris à une certaine hauteur du sol (voir *fig.* 138, p. 269).

Dans les expériences de *locomotion*, l'installation précédente ne conviendrait pas, l'homme se déplaçant sur une grande distance. Aussi l'étude de la *marche* nécessite-t-elle une disposition spéciale, sur laquelle nous reviendrons.

250. Une fois la soupape en place, les gaz expirés sont conduits par un tube de caoutchouc au compteur appelé *spiromètre*. Le spiromètre ordinaire indique, en décalitres, litres et centilitres, l'air expiré en un temps donné. Deux lectures, faites avant et après une expérience, donnent la quantité, en volume, d'air ayant circulé dans les poumons. Une expiration profonde à travers le spiromètre traduit ce que nous avons appelé la *capacité vitale* (§ 81).

La succession de mouvements d'une des aiguilles, si on les enregistrait, fournirait le rythme de la respiration; on pourrait tout simplement les compter à la vue.

Pour en revenir au spiromètre ordinaire, il faut dire que, *rarement*, ses indications sont précises. En effet sa construction même ne lui permet pas de demeurer exact pendant assez longtemps. De plus le soufflet qui le constitue

offre une résistance qui n'est pas négligeable aux gaz qui le traversent. Il faut donc le *tarer* fréquemment : on y fait passer, par déplacement, un volume connu d'air  $V$  ; si le spiromètre indique  $V + a$ , la quantité  $a$  sera la *tare*. Suivant que  $a$  est positif ou négatif, on l'ajoutera au volume indiqué ou bien on l'en retranchera (*fig. 225*).

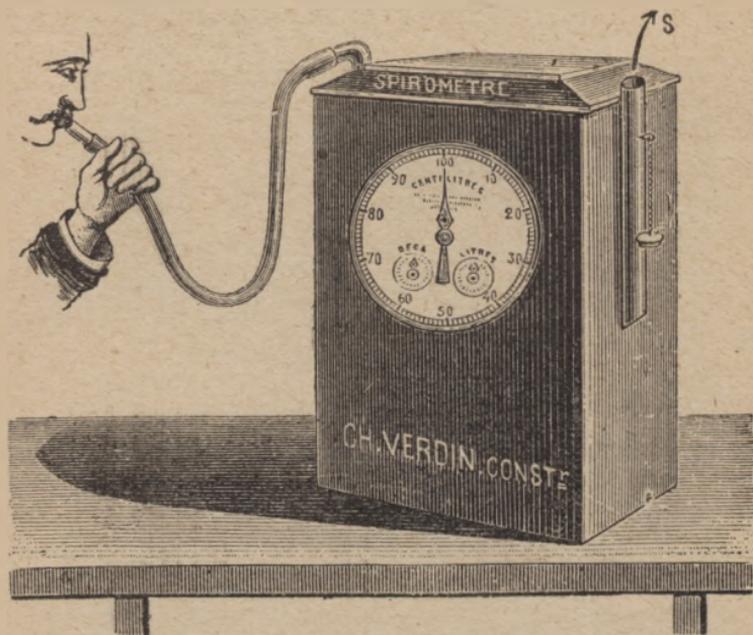


FIG. 225. — Spiromètre ordinaire.

251. — Un *spiromètre automatique* dû à Tissot permet des mesures correctes et des déterminations à la pression qui règne au moment de l'expérience. Il se compose (*fig. 226*) d'une cloche en cuivre très mince ( $\frac{2}{10}$  de millimètre), munie sur sa paroi intérieure de deux tubes métalliques creux, très légers, pour augmenter le déplacement d'eau. Elle plonge dans une cuve  $K$  dont la partie annulaire est remplie d'eau. Un tube  $G$  amène les gaz expirés. La cloche se soulève et se trouve, dans toutes ses positions, exactement équilibrée par un *contrepois automatique*. En effet une fine cordelette d'acier maintient la cloche en passant sur une poulie d'aluminium sans frottement sensible et va soutenir un contrepois formé d'un tube de verre cylindrique  $V$  ; ce tube est

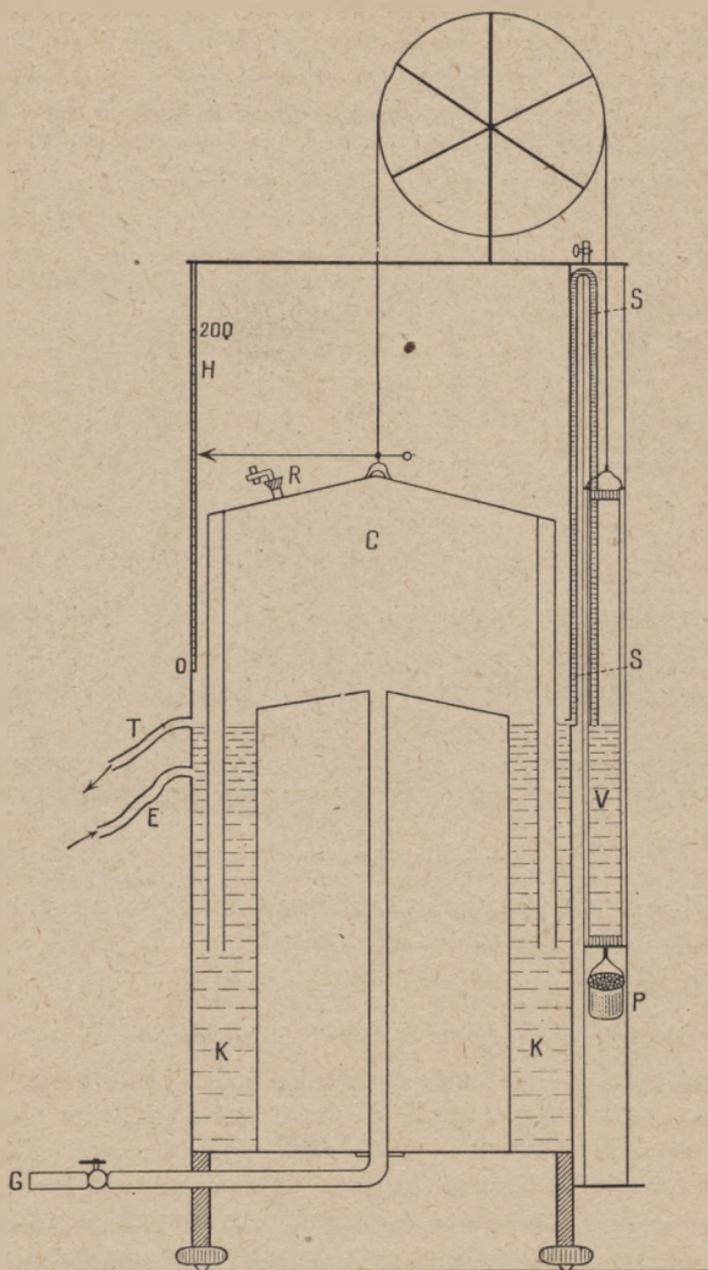


FIG. 226. — Spiromètre automatique de Tissot.

fermé a sa partie inférieure et porte un plateau P contenant de la grenaille de plomb ; mais surtout il a une section rigou-

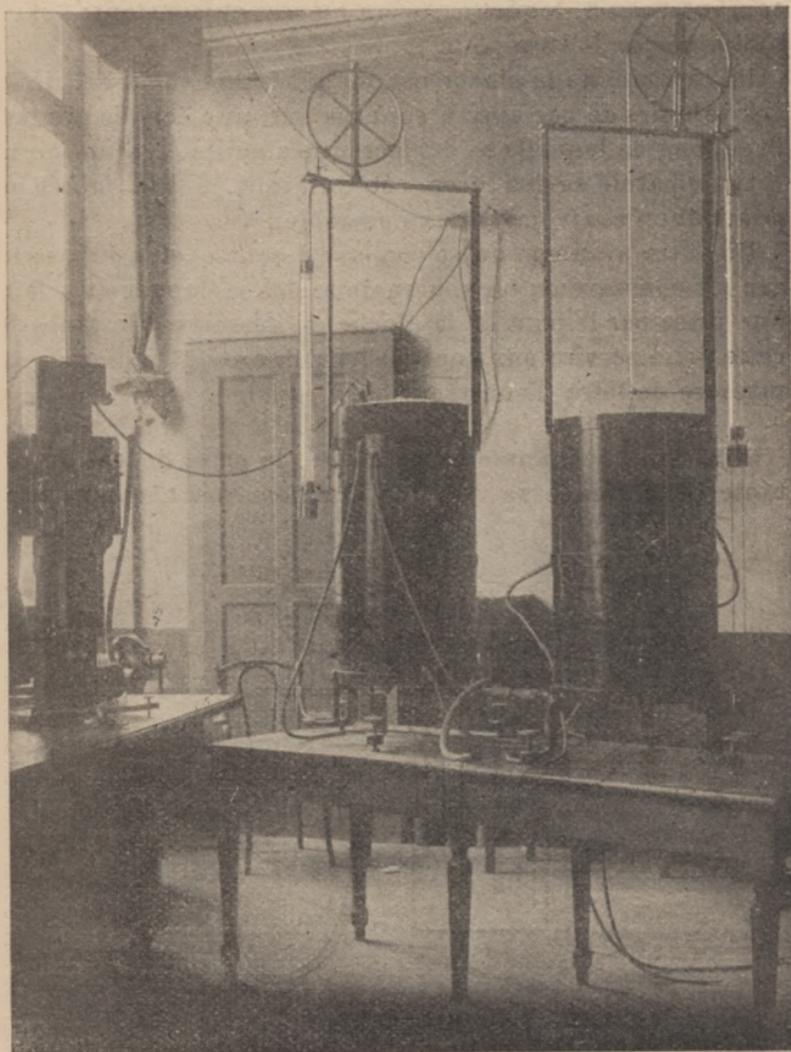


FIG. 227. — Deux spiromètres automatiques conjugués (à gauche est un audiomètre pour analyse).

reusement égale à celle des tubes creux de la cloche. Un siphon S met en communication la cuve et le tube V. Dès que ce siphon est amorcé, un soulèvement de la cloche pro-

duira un abaissement égal du tube V; l'eau s'écoulera dans celui-ci par le siphon et fera équilibre à l'augmentation de poids apparente de la cloche. D'ailleurs, la cuve reçoit un courant d'eau E, lequel assurera un niveau constant; l'excès s'élimine par le trop-plein T.

La capacité de la cloche est, en général, de 50 à 250 litres. Les volumes de gaz expiré sont lus sur une échelle graduée H, le long de laquelle se déplace une aiguille en aluminium.

Un appareil de 200 litres est suffisant. S'il le fallait, on pourrait en *conjuguer* deux ensemble.

Un autre avantage du spiromètre à contrepoids est que les gaz s'y conservent; on pourra donc les mélanger et y faire une prise par le haut de la cloche en desserrant la pince R; cette prise servira aux analyses. La figure 227 indique cette manière de faire (l'analyseur est à gauche).

252: Avec le compteur ordinaire, la prise de gaz durant toute l'expérience se fait par *fractionnement*. Avant de se

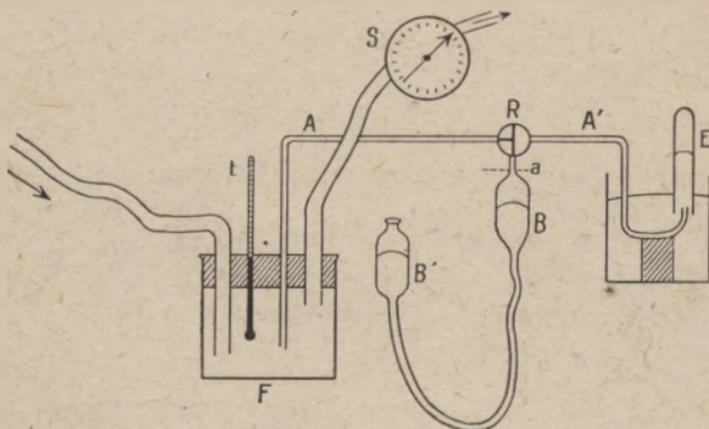


Fig. 228. — Appareil d'échantillonnage des gaz expirés.

rendre au spiromètre, les gaz traversent un flacon F de faible capacité, 1 litre environ (*fig.* 228). Dans ce flacon pénètre un tube capillaire AA', lequel se prolonge extérieurement pour constituer une *dérivation*, et se termine par une partie coudée qui plonge dans du mercure.

La dérivation comprend un robinet R à trois voies pouvant faire communiquer A et B (fig. 229), A et A', ou B et A'.



FIG. 229.

Positions du robinet à trois voies.

Étant dans la première position, on soulève le réservoir à mercure B' pour remplir B jusqu'au trait *a* : on règle l'ouverture pour que, accrochant ensuite à un support bas le ré-

servoir B', il se produise un écoulement *lent* du mercure de B vers B'. L'expérience terminée, on passe à la position n° 2 qui isole l'*air dérivé*.



FIG. 230.— Appareil d'échantillonnage et de mesure des gaz respiratoires (J. Amar).

Pour le recueillir, on se met dans la troisième position et, soulevant B', on chasse l'air de B dans une éprouvette remplie de mercure E. On aura soin de chasser au dehors les premières bulles afin de rincer le canal RA'.

Pendant que cette dérivation continue à lieu, tout le

reste des gaz expirés se rend au spiromètre S qui en accuse la quantité. La température moyenne de ces gaz est donnée par le thermomètre *t*. Suivant le réglage du robinet, on arrive à ne recueillir que 100 à 150 centimètres cubes de gaz en quelques minutes ou une demi-heure, dans le réservoir B.

Une disposition très pratique, pour certaines expériences, est de placer deux dérivations sur le récipient F. C'est ce que montre la figure 230. Enfin, nous avons monté un appareil plus simple sur table à roues caoutchoutées pouvant suivre le sujet en expérience. C'est l'*Echantillonneur respiratoire* (1915).

**253. Analyse des gaz.** — On a recueilli, par exemple, 150 centimètres cubes de gaz dans l'éprouvette E, ou bien on a fait une prise dans le spiromètre automatique de Tissot. Il s'agit d'*analyser* cet échantillon. Voici deux appareils ou *audiometres* qui peuvent être employés à cet effet : tous deux se chargent de réactifs absorbants pour le gaz carbonique et pour l'oxygène.

1° *Eudiometre de Laulanié* (1). — Le modèle courant et le plus pratique comprend deux ampoules K et P contenant l'une de la lessive de potasse pour absorber le gaz carbonique, l'autre du phosphore immergé dans l'eau, lequel a la propriété de fixer rapidement l'oxygène de l'air.

Les deux tubes gradués *m* et *g* servent l'un de manomètre, l'autre de mesureur de gaz, et communiquent en bas par une portion courbée, recevant l'eau du réservoir R. Un robinet à trois voies *r* permet, en soulevant le réservoir R, de faire passer le gaz contenu dans l'ampoule *a*, soit dans K, soit dans P (*fig.* 231).

Tous les robinets étant ouverts, on élève le réservoir R grâce à la manivelle M : l'air est chassé par le tube *r'i*; on tourne alors le robinet *r'* pour ouvrir sur *s* et on abaisse le réservoir : les gaz sont aspirés par *s* mis en rapport avec le spiromètre ou l'éprouvette à gaz (voir *fig.* 227). On amène l'eau jusqu'au zéro de la graduation, placé en bas. Toute la capacité offerte au gaz est alors de 100 centimètres cubes dont

(1) Laulanié (*Arch. de Physiol.*, 1894; p. 740).

25 représentés par le tube gradué *g*. Fermant *r'* et ouvrant *r* sur l'ampoule à potasse, on y envoie le gaz : la lessive est refoulée vers B. On abaisse et remonte le réservoir R pour renouveler le contact avec cette lessive. Pendant ce temps, *r''*

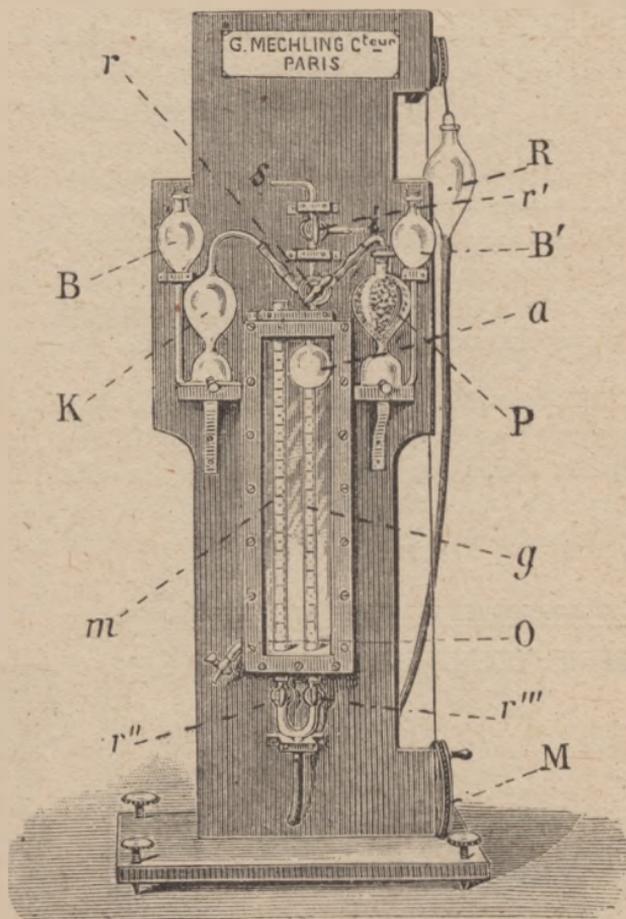


FIG. 231. — Eudiomètre de Lalande.

est fermée; on ouvre au moment où, ramenant les gaz en *g*, on en lit le volume à la pression atmosphérique, le niveau de l'eau étant alors le même en *m* et en *g*. Soit 3 centimètres cubes la lecture, à partir du zéro. Cela veut dire que 3 0/0 en volume ont été absorbés par la potasse et représentent le taux de gaz carbonique.

On fait une manœuvre semblable du côté du phosphore, en y prolongeant un peu plus le séjour des gaz. Soit 20 la nouvelle lecture : la différence  $20 - 3 = 17$  représente le volume absorbé par le phosphore ; 17 0/0 est donc le taux d'oxygène.

Remarquons que les tubes gradués plongent dans un manchon rempli d'eau qui atténue les variations de température durant la manipulation. On connaît, d'autre part, la pression atmosphérique du moment.

Comme précautions, faire deux lectures pour s'assurer que chaque absorption a été totale, parfaite ; analyser, au préalable de l'air pur, lequel devra donner 21 0/0 d'oxygène et presque rien comme gaz carbonique (0,03 0/0). Eviter la moindre trace d'essence de térébenthine, car elle détruit le pouvoir absorbant du phosphore. Graisser les robinets.

254. 2<sup>o</sup> *Eudiomètre de Bonnier et Mangin*. — Le principe de cet appareil est le même que pour le précédent, sauf que l'absorption d'oxygène est faite au moyen d'une solution concentrée de *pyrogallate de potasse*, au lieu de phosphore.

C'est un tube capillaire *dfg* recourbé en U à son extré-

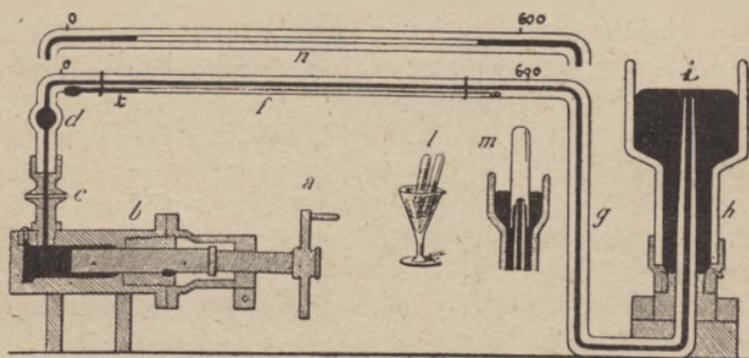


FIG. 232. — Eudiomètre de Bonnier et Mangin.

mité libre, laquelle pénètre dans une cuve à mercure (*fig. 232*) ; l'autre extrémité se soude à un cylindre de métal rempli aussi de mercure et fermé par un piston étanche actionné par une manivelle *a*. Le tube capillaire, bien calibré, est gradué de 0 à 600 très exactement. En enfonçant le piston, on remplit le tube de mercure jusqu'à son orifice *i*,

lequel devra se trouver à quelques millimètres sous le mercure.

Les solutions de réactifs ont été préparées dans de petites éprouvettes renversées sur du mercure (*l*). La solution de potasse s'obtient en introduisant des pastilles de potasse dans l'éprouvette contenant de l'eau. La solution de pyrogallate se fait en dissolvant à saturation de l'acide pyrogallique et, dans l'éprouvette remplie de ce liquide, introduisant quelques pastilles de potasse : le liquide sera brun clair. Il est essentiel que les deux solutions soient saturées.

*Operation.* — Pour faire une analyse, on enfonce l'éprouvette à gaz (*m*) par-dessus le tube *i* jusqu'à ce que la pointe de celui-ci y paraisse. Tournant alors le piston légèrement, on fera une prise de gaz. On retire l'éprouvette, et, par le mouvement du piston, l'air à analyser sera amené dans le tube gradué et enfermé entre la division finale marquée 600 et une division qu'on lira à gauche, soit 150. On a donc  $600 - 150 = 450$  divisions ou volumes d'air à analyser. C'est *N*. La lecture ainsi faite à rebours évitera le séjour du gaz dans l'ampoule *d*, séjour qui donne lieu à de petites erreurs, comme nous l'avons constaté.

Par une manœuvre semblable, on fera une prise de la solution potassique, l'amenant jusqu'au milieu du tube *g*, puis l'expulsant aussitôt. Si, ensuite, on y fait passer l'air à diverses reprises, tout le gaz carbonique sera absorbé. Rame-nons à 600, la division à gauche sera, par exemple, 165 ; donc :  $N' = 600 - 165 = 435$  volumes. On voit que  $450 - 435 = 15$  volumes sur 450 représentent la teneur en gaz carbonique.

Nouvelle manœuvre pour faire une prise de pyrogallate et absorber l'oxygène. Soit  $N'' = 600 - 240 = 360$  volumes.

La teneur en oxygène est donc :  $435 - 360 = 75$  volumes, sur 450 qui représentent l'air total analysé.

Les taux seront :

$$\text{CO}_2 = \frac{15}{450} \times 100 \quad \text{ou} \quad 3,33 \text{ 0/0 ;}$$

$$\text{O}_2 = \frac{75}{450} \times 100 \quad \text{ou} \quad 16,66 \text{ 0/0.}$$

Le calcul est ainsi des plus simples. On a obtenu  $N$ ,  $N'$  et  $N''$  ; on écrira :

$$\text{CO}_2 \text{ 0/0} = \frac{N - N'}{N} \times 100 ;$$

$$\text{O}_2 \text{ 0/0} = \frac{N' - N''}{N} \times 100.$$

La rapidité des opérations (environ quinze minutes) pourrait dispenser de la correction de température. Il convient, cependant, de la noter sur le thermomètre  $t$ . L'absorption de l'oxygène sera accélérée en agitant la colonne gazeuse au contact de la paroi humectée ; cela réduira la durée totale à dix minutes. La sensibilité des mesures sera accrue en lisant les demi-divisions.

*Précautions.* — Faire deux ou trois lectures avant de passer d'un réactif au suivant ; après avoir brassé le gaz dans la partie humide du tube, le ramener *vivement* dans la partie graduée, et prendre au moins 400 volumes à chaque analyse.

Par contre, chasser les réactifs *très lentement*. L'opération terminée, aspirer une goutte de solution acidulée par l'acide chlorhydrique et nettoyer le tube ; on achève par un lavage à l'eau distillée et à l'air sec. Le mercure apparaîtra sous l'aspect d'une colonne homogène et très brillante.

Vu la faible capacité du tube, 1 centimètre cube d'air suffit à plusieurs analyses, et, en outre, l'appareil tout entier est aisément transportable.

**255. Corrections et calculs des volumes gazeux.** — On a recueilli des gaz à la température  $t$  et à la pression atmosphérique  $H$ . Pour comparer les quantités entre elles, et pour calculer la dépense énergétique d'après l'oxygène consommé (§ 107), on doit toujours ramener le volume  $V_t$  ainsi mesuré à la température de  $0^\circ$  et à la pression de 760 millimètres de mercure ; ce sont des « conditions normales ». Comme le volume d'un gaz augmente avec la température, de  $\alpha = \frac{1}{273}$  par degré, et qu'il diminue quand la pression s'élève, on écrit :

$$V_0 = \frac{V_t}{1 + \alpha t} \times \frac{H}{760},$$

ou approximativement :

$$V_0 = \frac{0,36 \times V_t \times H}{273 + t}$$

Dans le cas de l'eudiomètre de Laulanié, la pression  $H$  mesure la pression de l'air supposé sec et la tension  $F$  de la vapeur d'eau à la température  $t$ , puisqu'on opère avec l'eau, Or cette tension  $F$  est donnée par les tables de Regnault (§ 264). On aura donc :

$$V_0 = \frac{0,36 \times V_t (H - F)}{273 + t}$$

$H$  étant la pression atmosphérique du moment,  $F$  la tension de la vapeur d'eau à la température de  $t^{\circ}$ . On obtient donc le volume des gaz secs à  $0^{\circ}$  et 760 millimètres.

La lecture  $H$  se fait sur le *baromètre normal*, le seul réellement correct (*fig. 233*). Il se compose d'un tube de 2 centimètres à 2<sup>cm</sup>,50 de diamètre, fermé à sa partie supérieure, ouvert à l'autre et retourné, plein de mercure, sur une cuve à mercure  $C$ . On fixe le tube au moyen de tasseaux robustes sur un support en chêne, et on le gradue de 0 à 800 millimètres, sa longueur totale étant voisine de 90 centimètres. Une vis micrométrique  $V$  permet d'enfoncer un cylindre  $K$  dans la cuve et de faire toujours affleurer le mercure de cette cuve à la pointe  $p$  du tube laquelle doit correspondre au zéro de la graduation On doit donc prendre l'affieurement comme

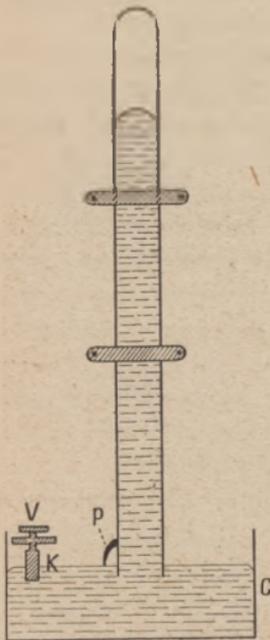


FIG. 233.  
Baromètre normal.

point de départ, en agissant plus ou moins sur la vis ; si on lit une hauteur de mercure  $H_t$ , à la température de  $t^{\circ}$ , on la ramènera à  $0^{\circ}$  en tenant compte des coefficients de

dilatation du mercure et du verre. On a :

$$H_0 = H_t \pm \alpha,$$

suivant que  $t$  est inférieur ou supérieur à  $0^\circ$ . Quant à  $\alpha$ , il est donné par des tables connues. On a, par approximation :

$$\alpha = 0,000168tH_t.$$

Enfin, comme précautions, vérifier toujours si le zéro du baromètre correspond au niveau de la pointe, et amener l'affleurement du mercure en rétrogradant par action sur la vis.

Si on fait usage du spiromètre de Tissot, un thermomètre plongé dans l'eau donnera la température, et le baromètre marquera la pression à laquelle les gaz sont mesurés.

Si on se sert de l'appareil à dérivation, la température des gaz sera, en moyenne, celle du récipient qui précède le compteur ; mais on ne pourra pas éviter ni sur ce point, ni sur la pression, une certaine erreur.

256. Connaissant le volume des gaz  $V_0$  pour la durée de l'expérience, et l'analyse ayant fourni les taux de  $\text{CO}^2$  et de  $\text{O}^2$ , il sera facile d'en déduire :

1° Le quotient respiratoire  $\frac{\text{CO}^2}{\text{O}^2}$  ;

2° Le total d'oxygène consommé : en effet, dans l'air inspiré pur, il y a 21 0/0 d'oxygène ; si l'analyse en donne 17 0/0, c'est que 4 0/0 ont été consommés par l'organisme.

On déterminera donc le taux  $r$  dans les gaz expirés ; la quantité restée dans le corps sera :

$$\frac{(21 - r) \times V_0}{100} ;$$

3° Le total de gaz carbonique éliminé, en procédant comme pour l'oxygène ; mais ici on prendra tout le gaz carbonique des gaz expirés ; il n'y en avait pas, pratiquement, dans l'air inspiré (0,03 0/0).

Soient, par exemple,  $v_0$  la consommation d'oxygène d'un

homme *au repos*, pendant dix minutes, et  $\frac{\text{CO}_2}{\text{O}_2} = 0,98$ ; ce quotient respiratoire est indicatif d'une utilisation de réserves hydrocarbonées. Le litre d'oxygène équivaut donc à  $5^{\text{Cal}},05$ , et les  $v_0$  litres représenteront la *dépense statique* du sujet. On a :

$$q_s = v_0 \times 5^{\text{Cal}},05.$$

Soit  $v'_0$  la quantité d'oxygène absorbée dans un travail égal à  $\mathfrak{C}$  pendant dix minutes, et  $\frac{\text{CO}_2}{\text{O}_2} = 0,97$ . Le coefficient  $5^{\text{Cal}},05$  sera de même applicable à cette *dépense brute* :

$$q = v'_0 \times 5^{\text{Cal}},05.$$

Il s'ensuit que la *dépense dynamique* sera purement de :

$$q_d = (v'_0 - v_0) 5^{\text{Cal}},05 \quad \text{ou} \quad q - q_s.$$

**257. Capacité vitale et rythme respiratoire.** — On mesurera la capacité vitale (§ 81) au moyen du spiromètre, et on ramènera le volume à 0° et 760 millimètres.

Pour le *rythme des respirations*, il convient de le faire tracer au spiromètre de Tissot, par exemple en munissant le tube de verre d'un style qui frotte légèrement devant une surface plane de papier enfumé et animée d'un mouvement de translation. On aura, en même temps, le volume de chaque respiration.

On peut aussi tout simplement enregistrer les courbes respiratoires grâce au *pneumographe*. Il faut placer cet appareil sur le sujet de telle manière qu'il soit à l'abri des secousses résultant du travail; les tambours explorateurs seront disposés sur le dos de l'ouvrier, au lieu d'être sur sa poitrine. Après avoir obtenu l'enregistrement au repos, laisser le pneumographe en place pour l'enregistrement au travail; les tracés auront chance d'être ainsi rigoureusement comparables.

On n'aura pas besoin de cette précaution si l'on enregistre les tonogrammes.

**258. Activité circulatoire.** — Le rythme des battements du cœur et du pouls sera également enregistré par l'emploi du

cardiographe et du sphygmographe à transmission (§ 203).

Il est difficile, d'une expérience à l'autre, de replacer ces appareils absolument comme ils l'étaient, pour pouvoir comparer entre elles les courbes obtenues, leur amplitude, leurs irrégularités, leur forme générale.

Il est plus utile de déterminer, avant et après le travail, la *pression artérielle*, en faisant usage, par exemple, de l'*oscillomètre de Pachon*

(fig. 234) : on dispose autour du poignet un brassard B qui forme poche; il est en caoutchouc garni d'étoffe, et on le relie par un tube de caoutchouc a à l'oscillomètre. Celui-ci comprend

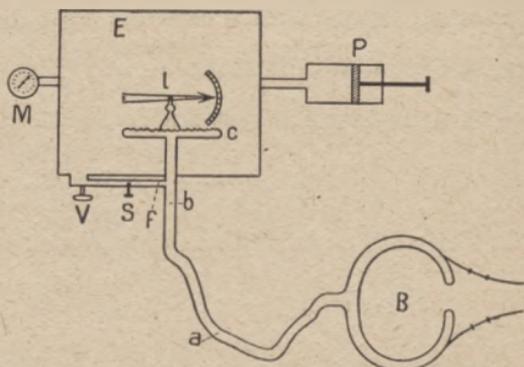


FIG. 234. — Oscillomètre sphygmométrique de Pachon.

laquelle on comprime de l'air au moyen d'une pompe P jusqu'à une pression toujours supérieure à celle que l'on doit mesurer : 20 centimètres, par exemple, pression qui se lit sur le manomètre M. Le conduit *fbu* étant ouvert, la même pression régnera dans le brassard comme dans la capsule anéroïde *c*, et l'aiguille *l* articulée à la membrane métallique sera au repos. Abaissons peu à peu la tension de l'air en desserrant la soupape V, et, par intervalles, écrasons le contact S pour fermer le conduit. Dès l'instant où la pression de l'air aura atteint celle du sang, l'aiguille sera prête à osciller. Le seuil de cette oscillation marque la *pression systolique*, la plus forte de l'artère.

Diminuons encore la tension de l'air, les oscillations indiqueront la *pression diastolique* ou minima quand elles atteignent leur plus grande amplitude pour bientôt diminuer. On lit ces pressions sur le manomètre M. L'appareil a, du reste, été rendu inscripteur (1918), sans être plus exact.

259. Mesure de la sensibilité tactile : esthésiomètres. —

Si on effleure la peau avec une pointe mousse, on pourra, les yeux fermés, indiquer le point touché. C'est ce que Weber appelait : le *sens du lieu* ou la *capacité de localisation* (1). On peut mesurer cette capacité par deux méthodes :

1° La peau étant bien tendue, on la touche avec une *pointe mousse*. Le sujet indiquera ensuite le point touché. Une erreur d'indication, évaluée en millimètres, fournira le degré de sensibilité localisatrice ; les deux grandeurs sont inverses ;

2° Avec l'esthésiomètre de Weber, compas à pointes mousses (fig. 235), pourvu d'une échelle, il suffit d'appuyer ces deux pointes légèrement et simultanément sur la peau.

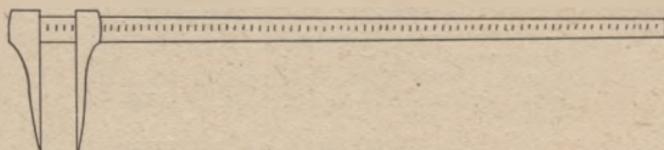


FIG. 235. — Esthésiomètre de Weber.

Le degré de sensibilité est donné par la plus faible distance des pointes lorsqu'elles sont toutes deux perçues distinctement. Il convient que ces pointes soient en ivoire, non en métal, qui paraîtra froid.

On possède, aujourd'hui, différents modèles d'esthésiomètres.

La capacité localisatrice est plus développée chez les aveugles, et plus chez les enfants que chez les adultes.

Voici des exemples de *distances liminales moyennes* obtenues sur des sujets normaux, en partie d'après Weber (2) :

|                                   | Adultes             | Enfants             |
|-----------------------------------|---------------------|---------------------|
| Pointe de la langue.....          | 4 <sup>mm</sup> ,10 | 4 <sup>mm</sup> ,10 |
| — du nez.....                     | 6 ,80               | 4 ,50               |
| Creux de la main.....             | 8 ,90               | »                   |
| Paupières.....                    | 11 ,30              | 9 ,00               |
| Dos de la main.....               | 31 ,60              | 22 ,60              |
| Sternum.....                      | 45 ,10              | 33 ,80              |
| Milieu du dos, bras, cuisses .... | 67 ,70              | 40 ,60              |

(1) Weber, *Wagner's Handb. d. Physiol.*, III, 2 Abteil., p. 524.

(2) Consulter Victor Henri (*Arch. de Physiol.*, 1893, p. 619-267); — Marillier et Philippe (*Journal de Physiol.*, 1903, p. 65).



L'appareil est portatif, tous les organes étant disposés sur une planche de 70/50 centimètres. Il est constitué par une partie graphique et une partie signalétique (1).

1° *Partie graphique.* — Elle comprend un cylindre enregistreur C à mécanisme pratique et nouveau, qui fait *un tour* par seconde et par expérience. On obtient ce résultat en armant le ressort d'un barillet B au moyen du levier extérieur L. Celui-ci, d'abord abaissé à fond, est ensuite ramené à la position debout. On réalise la mise en marche en appuyant sur le déclancheur automatique D, petit câble vissé au barillet, comme on en voit aux appareils photographiques. L'entraînement du cylindre est assuré par le toc métallique X rabattu, engrené à la roue dentée R. On ne relève ce toc que pour libérer le cylindre et le tourner à la main, en vue de noircir le papier enregistreur. Mais il faut avoir soin de le rabattre aussitôt, *avant l'expérience.*

Ajoutons encore un détail qui a son importance. Au bout de plusieurs années, si le ressort vient à se polir, à faiblir, on en réglerait la pression en agissant sur la petite vis V. Dans ces conditions, la rotation sera toujours régulière, amenant la position du cylindre exactement à la butée ou *masse.*

D'autre part, deux capsules manométriques M et M' — dont on va voir le rôle —, sont conjuguées par tubes de caoutchouc avec deux tambours inscripteurs T et T'. Et un signal double de Desprez S inscrit les vibrations d'un diapason P, à l'instant précis où s'ouvre le diaphragme d'un obturateur photographique O. C'est le diaphragme lui-même qui, en s'ouvrant, lance le courant d'une pile à travers le signal; une petite vis de réglage et une lame de ressort E permettent d'obtenir un contact instantané (de 2 volts).

On notera que le diapason, entretenu par une pile distincte, fait 100 vibrations doubles, c'est-à-dire qu'il donne le 1/100 de seconde. Mais la vitesse du cylindre débite 6 millimètres de papier par 1/100 de seconde, et garantit ainsi la

(1) Nous reproduisons ici le texte de notre Mémoire paru dans le *Bulletin portugais des Sciences Naturelles* (12 juillet 1918).

lecture du  $1/600$  de seconde. Une précision supérieure à celle-là n'existe pas et d'ailleurs, ne serait qu'un leurre.

2° *Partie signalétique*. — Elle est conçue pour produire des signaux visuels, auditifs et tactiles.

a) *Signal lumineux*. — L'obturateur O fait partie d'une boîte H ayant  $10/6/5$  centimètres, et montée sur un support à vis, dont le jeu de coulisse amène l'ouverture du diaphragme au niveau des yeux.

A l'intérieur de la boîte est une petite lampe électrique réunie à un accumulateur de 4 volts par des fils qui traversent la planche. Des écrans colorés *bleu, rouge*, s'insèrent derrière le diaphragme que l'on ouvre au moyen du déclancheur D'.

Mais, au moment même de cette ouverture, qui découvre la lumière, le signal Desprez trace une encoche sur le papier. Le sujet, éprouvant une sensation visuelle, réagit en appuyant le doigt sur l'une des capsules manométriques M ou M', suivant qu'il voit bleu ou rouge, celles-ci portant un disque à la couleur correspondante. Il y a donc là *discernement, choix, acte psychique*, et la durée de cette réaction délibérée se mesure par l'intervalle entre les deux encoches.

De la valeur ainsi obtenue, il faut retrancher  $1/100$  de seconde, à cause du retard de transmission de la pression du doigt par un tube de  $0^m,30$ , mais uniquement pour les réactions visuelles.

Si le sujet réagit toujours sur la même capsule, avec une couleur indiquée d'avance, sa réaction sera *simple* et plus brève que la précédente. La différence de durée exprimera le temps nécessaire à l'acte psychique considéré.

Les réactions simple et délibérée sont désignées par R et D.

On supprime la lumière en tournant le bouton I de l'interrupteur; on modifie la surface lumineuse en diaphragmant à volonté; on varie, enfin, le temps de pose, ou l'on fait usage de l'*instantané* par fractions de seconde en déplaçant l'aiguille.

De ces multiples combinaisons entre le temps, la surface lumineuse et sa coloration, résulte, pour le psychologue et le physiologiste, une grande richesse d'expérimentations.

Et entre autres applications, il y a celle de la vision des signaux lumineux instantanés, chez les employés de chemins de fer, par exemple.

b) *Signal auditif*. — Pour les réactions auditives et tactiles, le sujet a les yeux bandés de noir, et l'on doit s'assurer qu'il ne voit réellement pas (un bandeau de soie). Le son est produit par un petit marteau Z en forme de levier articulé, tombant d'une certaine hauteur sur un timbre en bronze que l'on a fixé sur la membrane de la capsule M. Le candidat pose un doigt sur l'autre capsule, et réagit par une pression aussitôt la sensation sonore perçue. Entre l'encoche tracée par la chute du marteau et celle du doigt, l'intervalle mesure le temps de réaction auditive.

Un petit ressort amortit le choc du marteau, et empêche le rebondissement. Une vis de réglage permet de modifier la hauteur de chute, et, par conséquent, l'intensité du son. Ce facteur est intéressant, soit pour diagnostiquer l'acuité de chacune des deux oreilles — l'autre étant bouchée —, soit pour évaluer l'audition mono, ou bi-auriculaire.

a) *Signal tactile*. — Les yeux toujours bien bandés, et un doigt de chaque main posé sur les capsules, l'observateur lui donne un petit coup sec du médius sur le doigt de droite; ce qui se traduit par une encoche. Le sujet réagit du même doigt ou du gauche, et l'on a une seconde encoche, dont la distance à la première mesure le temps de réaction tactile.

Il faut vérifier que toutes les pointes inscrivantes sont parfaitement sur une même génératrice du cylindre. Le chariot F, sur lequel peut glisser le support qui les soutient, est destiné à cette vérification. On habituera le candidat à ce genre d'observations par au moins trois épreuves non enregistrées, en lui recommandant de réagir le plus vite possible.

« L'usage du Psychographe, avec les précautions susdites, autorise les plus exactes déterminations, et rend la technique uniforme entre les mains des observateurs... »

**261. Mesure de l'énergie thermique du corps.** — Une mesure rigoureuse de l'énergie thermique nécessiterait une

installation dispendieuse, telle que la *chambre calorimétrique* d'Atwater et Benedict, les calorimètres de d'Arsonval, etc., pour lesquels nous renvoyons aux mémoires originaux <sup>(1)</sup>.

L'énergie thermique comprend l'énergie de *déperdition physique* et celle du minimum physiologique. La déperdition se calcule d'après les relations théoriques du rayonnement et de la convection dans l'air à une température extérieure de  $t^{\circ}$  (§ 173).

Si on applique la loi de Newton, on prendra  $K_1 = 0^{\circ},00015$  pour le pouvoir émissif. Si on applique la loi de Stefan (§ 179), on écrira  $K'_1 = 1,02 \times 10^{-12}$  dans la formule :

$$q_1 = K'_1 [(T + 273)^4 - (t + 273)^4].$$

Comme pouvoirs émissifs des substances, on possède ceux de Pécelet, dont l'exactitude est très discutée (Wiedeburg, 1898). Ce sont, par exemple :

|                                       |                          |
|---------------------------------------|--------------------------|
| Argent poli.....                      | $K_1 = 0^{\circ},000036$ |
| Cuivre rouge.....                     | 0,000044                 |
| Verre .....                           | 0,0000808                |
| Sable fin.....                        | 0,0001000                |
| Peinture à l'huile.....               | 0,0001030                |
| Papier.....                           | 0,0001040                |
| Bois.....                             | 0,0001000                |
| Etoffes de laine <sup>(2)</sup> ..... | 0,0001020                |
| Calicot.....                          | 0,0001010                |
| Etoffes de soie.....                  | 0,0001020                |
| Eau.....                              | 0,0001470                |
| Huile.....                            | 0,0002010                |

Les formules ci-dessus concernent le rayonnement dans l'air en repos, sans courants.

<sup>(1)</sup> Jules Lefèvre, dans sa *Bioénergétique* (*loc. cit.*, p. 77 et suiv.), en fait une étude complète et méthodique.

<sup>(2)</sup> Pour le rayonnement des vêtements, Rubner adopte  $K_1 = 0^{\circ},000113$  (*Die Gesetze...*, ch. XIII).

Dans l'air en mouvement, la perte calorifique est plus grande, elle est proportionnelle à la vitesse d'un courant horizontal, comme l'ont reconnu Oberbeck (1) sur des corps inanimés, et Jules Lefèvre (2) sur l'homme (§ 183).

Le couloir à ventilation de Lefèvre est une grande caisse en zinc de 3 mètres de long (fig. 237), soutenue intérieurement par une charpente en bois et composée de trois parties, à savoir : une chambre cylindrique centrale destinée au

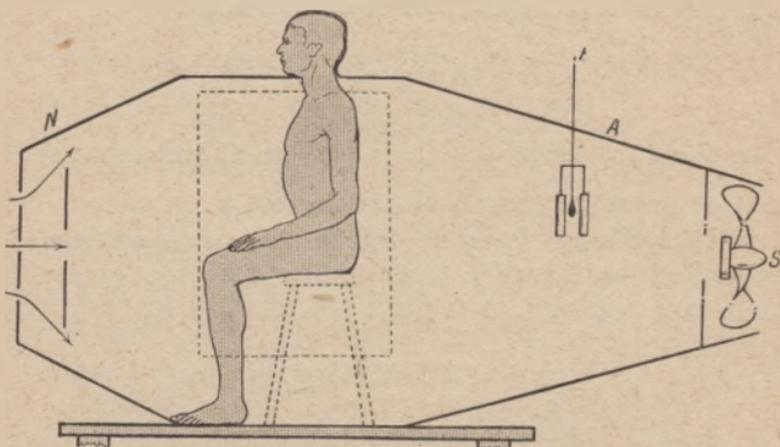


FIG. 237. — Couloir à ventilation (J. Lefèvre).

sujet, et deux couloirs de ventilation. La chambre communique largement avec les couloirs; elle présente latéralement une large porte qui permet au sujet d'entrer dans l'appareil, et que l'on visse hermétiquement sur cuirs pendant l'expérience (en pointillé).

« Le sujet, assis à l'intérieur sur un escabeau, peut sortir la tête par un orifice circulaire, sur le rebord duquel s'adapte un capuchon de caoutchouc fixé, d'autre part, en *passerelle*, à la tête. La respiration a donc lieu à l'air libre sans que l'atmosphère intérieure cesse d'être séparée de l'extérieur.

(1) Oberbeck (*Wied. Ann.*, t. LVI, p. 397; 1895).

(2) Jules Lefèvre (*loc. cit.*, p. 103).

« Le couloir d'aval relie la chambre calorimétrique à un aspirateur S mis en mouvement par l'eau et capable de fournir jusqu'à 600 mètres cubes à l'heure.

« Le couloir d'amont N relie d'autre part le calorimètre à trois prises d'air dont les orifices s'ouvrent dans l'atmosphère extérieure : sur chacun de ces orifices peut s'adapter à frottement étanche un anémomètre (§ 208). »

Connaissant les sections  $s_1, s_2, s_3$  des prises d'air et les vitesses moyennes  $v_1, v_2, v_3$  du courant, on calcule le volume d'air soufflé en faisant la somme des produits :

$$s_1 v_1 + s_2 v_2 + s_3 v_3 \dots = SV.$$

De bons thermomètres au  $\frac{1}{10}$  sont placés en amont et en aval, et donnent l'échauffement  $\theta$  de l'air.

Soit V la vitesse moyenne pour la durée de l'expérience ; évaluons SV en litres ; le poids du litre d'air étant 1<sup>gr</sup>,293, la masse totale M sera :

$$M = S \times V \times 1,293 \text{ grammes.}$$

Pour tenir compte de la pression atmosphérique H et de la température  $t$  de l'air, on écrira plus exactement :

$$M = S \times V \times 1,293 \times \frac{0,36 \times H}{273 + t}.$$

L'échauffement  $\theta^\circ$  correspondra donc à :

$$Q = M \times \theta \times 0^{\text{cal}},237,$$

$0^{\text{cal}},237$  étant la chaleur spécifique de l'air.

Il est possible, avec cette disposition simple et correcte, d'évaluer la déperdition thermique pour différentes vitesses et différentes températures du courant d'air (§ 183).

**262. Conductibilité thermique:** — On peut vouloir évaluer cette déperdition sous l'influence de vêtements variés en tenant compte de leur coefficient de conductibilité ou de

transmission  $c$  (§ 178). Voici quelques valeurs de ce coefficient, en outre de celles que nous avons déjà données :

| SUBSTANCES              | C                          | AUTEURS   |
|-------------------------|----------------------------|---|
| Air.....                | 0°,0000500<br>0,0000532    | Winkelmann ( <i>Wied. Ann.</i> , 1880, t. X, p. 668).<br>Rubner (voir § 170 ci-dessus). |
| Cuivre.....             | 1,0400000                  | H.-F. Weber.  |
| Fer.....                | 0,1587000                  | Berget ( <i>Comptes Rend. Sc.</i> , t. CVII, p. 227; 1888).                             |
| Marbre.....             | 0,0018000                  | Forbes ( <i>Proc. Ed. Soc.</i> , 1872-1875).  |
| Craie.....              | 0,0022000<br>0,0002900 (1) | Herschell.<br>Lees ( <i>Proceed. Roy. Soc.</i> , 1904, t. LXXIV).                       |
| Chêne.....              | 0,0001300 (2)              | Id.   |
|                         | 0,0001500 (3)              | Id.   |
|                         | 0,0003500                  | Id.   |
| Erable.....             | 0,0001500                  | Id.   |
|                         | 0,0001500                  | Id.   |
| Pin, sapin.....         | 0,0000900                  | Forbes ( <i>loc. cit.</i> ).  |
| Liège.....              | 0,0001300                  | Forbes, Mauro ( <i>Il Politecnico</i> , dec. 1910).                                     |
| Gomme dure.....         | 0,0000890                  | Stefan ( <i>Wien Ber.</i> , t. LXXIV, p. 438; 1879).                                    |
| Cire d'abeilles.....    | 0,0000870                  | Forbes ( <i>loc. cit.</i> ).  |
| Corne.....              | 0,0000870                  | Id.   |
| Carton.....             | 0,0004530                  | Id.   |
| Papier.....             | 0,0003100                  | Lees ( <i>loc. cit.</i> ).  |
| Caoutchouc vulcanisé.   | 0,0000890                  | Forbes ( <i>loc. cit.</i> ).  |
| Sciure de bois (4)..... | 0,0001230                  | Id.   |
| Feutre.....             | 0,0000900                  | Id.   |
| Laine.....              | 0,0000550                  | Lees ( <i>loc. cit.</i> ).  |
|                         | 0,0000400                  | Forbes ( <i>loc. cit.</i> ).  |
| Coton comprimé.....     | 0,0000330                  | Id.   |
| Coton en flocons.....   | 0,0000433                  | Id.   |
| Ouate de coton.....     | 0,0001250                  | Mauro ( <i>loc. cit.</i> ).   |
| Huile d'olive.....      | 0,0003900                  | Waschmuth ( <i>Phys. Zeit.</i> , 1901, t. III, p. 79).                                  |
| Neige (5).....          | 0,0003600                  | Okada ( <i>Melecr. Zeit.</i> , 1905, t. XXII, p. 330).                                  |

(1) Parallèlement aux fibres.

(2) Perpendiculairement aux fibres et suivant un rayon.

(3) Perpendiculairement aux fibres et à un rayon.

(4) Sur la sciure de bois de sapin Mauro (*loc. cit.*) trouve une valeur plus grande : 0,0001830.

(5) Nous avons développé ces indications, vu la difficulté de les trouver ainsi réunies même dans les ouvrages spéciaux.

En ce qui concerne les vêtements usuels, le tableau de Rubner (§ 178) est le plus digne de confiance. Le calcul du coefficient de protection (§ 180) ou de la chaleur transmise par un tissu doit tenir compte de l'épaisseur de ce tissu. Mais il faut remarquer que le volume d'air emprisonné dans une fourrure est très important comme isolant, alors que la peau elle-même n'aurait qu'une très faible épaisseur. C'est ainsi que le pouvoir conducteur diminue avec l'abaissement de densité du tissu. Exemple :

|                     |         |                         |
|---------------------|---------|-------------------------|
|                     | Densité | C                       |
| Tricot de lin ..... | 0,302   | 0 <sup>e</sup> ,0001181 |
| — .....             | 0,420   | 0,0001523               |

Le tableau suivant, établi par Rubner, est très instructif :

| DÉSIGNATION            | ÉPAISSEUR            |                     | DENSITÉ<br>MOYENNE | VOLUME<br>D'AIR<br>emprisonné |
|------------------------|----------------------|---------------------|--------------------|-------------------------------|
|                        | TOTALE               | DE LA PEAU          |                    |                               |
| Peau de chat noire.... | 12 <sup>mm</sup> ,60 | 0 <sup>mm</sup> ,60 | 0,0429             | 96,7 0/0                      |
| — d'agneau noire...    | 13,00                | 0,30                | 0,0484             | 96,4                          |
| — de lapin .....       | 13,00                | 0,50                | 0,0304             | 97,7                          |
| — de rat musque...     | 14,00                | 0,60                | 0,0576             | 95,6                          |
| — de loutre.....       | 17,00                | 0,90                | 0,0638             | 95,1                          |
| — d'ours blanc.....    | 21,50                | 0,90                | 0,0582             | 95,5                          |
| — de castor .....      | 22,00                | 0,80                | 0,0514             | 96,1                          |
| Skunks.....            | 26,00                | 0,50                | 0,0410             | 96,8                          |
| Peau de mouton.....    | 40,00                | 0,70                | 0,0461             | 96,4                          |
| Cachemire.....         | 0,37                 |                     | 0,364              | 72,0                          |
| Batiste.....           | 0,29                 |                     | 0,179              | 86,7                          |
| Soie.....              | 0,25                 |                     | 0,329              | 74,7                          |

263. **Déperdition calorifique dans l'eau.** — Pour évaluer cette perte dans le cas d'un bain d'eau à une température de  $t^{\circ}$ , la technique est assez simple; nous l'avons déjà indiquée (§ 186).

D'après les travaux théoriques de Boussinesq (1), vérifiés par divers auteurs (2), la perte de chaleur dans un liquide au repos a

(1) Boussinesq (*Comptes Rendus Sc.*, t. CXXXII, CXXXVIII, CXL).

(2) L. Ser, *Physique industrielle*, t. I, p. 160; 1888.

pour expression :

$$Q = A \times \Delta^{0,233} \times K^{0,533} \times C^{0,467} \times (T - t)^{1,225},$$

dans laquelle  $A$  est une constante,  $\Delta$  le coefficient de dilatation du liquide, coefficient variable avec la température,  $K$  la conductibilité calorifique et  $C$  la chaleur spécifique. Nous ne ferons pas cette application à l'homme d'une formule qui demande, avant tout, une discussion de chacun de ses termes.

Rappelons aussi l'étude d'Aimé Witz <sup>(1)</sup> sur les « actions de paroi »; cet éminent ingénieur reconnut que la vitesse de refroidissement d'une paroi au contact de l'eau a pour expression :

$$v = K' \frac{S}{V} \times \alpha^{1,203 + 0,00048\alpha},$$

$\alpha$  étant l'écart de température.,  $S$  la surface et  $V$  le volume du corps;  $K'$  est une constante.

En posant  $\frac{S}{V} = 32$ , et  $v = 18^{\text{Cal}},05$  pour l'adulte lorsque :

$$\alpha = 35 - 5 = 30^{\circ},$$

(d'après J. Lefèvre), on obtient :  $K' = 0,009$ .

Prenant  $\alpha = 35 - 12 = 23^{\circ}$ , on arriverait à  $v = 12^{\text{Cal}},8$ ; Lefèvre obtint  $11^{\text{Cal}},70$ . C'est donc une assez bonne formule.

**264. Mesure de l'état hygrométrique.** — Nous avons re-

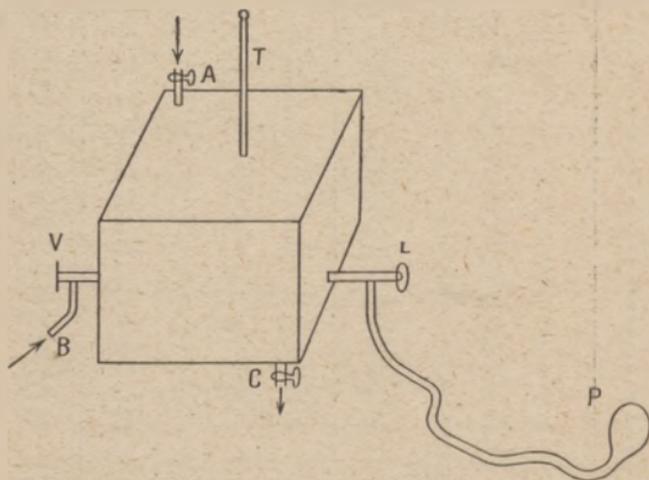


FIG. 238. — Hygromètre de Crova.

commandé (§ 181) l'usage de l'*hygromètre de Crova* (fig. 238).

(1) Aimé Witz, Thèse de Doctorat, 1878.

Cet instrument comprend un tube de laiton poli intérieurement, fermé en avant par un verre dépoli V et en arrière par une lentille L qui permet d'en voir l'intérieur. Le tube plonge dans une boîte en laiton contenant du sulfure de carbone traversé de A en C par un courant d'air : ce qui détermine l'abaissement de température indiqué au thermomètre T. Au moyen de la poire P, on aspire l'air de la pièce par le tube de plomb B et on observe par L la formation de buée, le dépôt de rosée. Dès que paraîtront des taches sombres, il suffira de lire la température  $t_1$  sur le thermomètre ; on connaît celle du dehors  $t$ . Les *Tables de Regnault* donneront les valeurs  $f$  et  $F$ . Voici, tout d'abord, un fragment de ces tables pour des températures comprises entre  $-10^\circ$  et  $+50^\circ$ .

TABLES DES TENSIONS DE LA VAPEUR D'EAU EN MILLIMÈTRES DE MERCURE (d'après Regnault, Thiesen et Scheel)

| TEMPÉRATURE | TENSION             | TEMPÉRATURE | TENSION             | TEMPÉRATURE | TENSION              |
|-------------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|----------------------|
| - 10°       | 2 <sup>mm</sup> ,13 | + 11°       | 9 <sup>mm</sup> ,86 | + 31°       | 33 <sup>mm</sup> ,59 |
| - 9         | 2,30                | 12          | 10,53               | 32          | 35,85                |
| - 8         | 2,49                | 13          | 11,24               | 33          | 37,61                |
| - 7         | 2,69                | 14          | 11,99               | 34          | 39,77                |
| - 6         | 2,90                | 15          | 12,79               | 35          | 42,04                |
| - 5         | 3,13                | 16          | 13,63               | 36          | 44,42                |
| - 4         | 3,38                | 17          | 14,52               | 37          | 46,92                |
| - 3         | 3,65                | 18          | 15,47               | 38          | 49,54                |
| - 2         | 3,94                | 19          | 16,47               | 39          | 52,29                |
| - 1         | 4,25                | 20          | 17,52               | 40          | 55,16                |
| 0           | 4,58                | 21          | 18,63               | 41          | 58,17                |
| + 1         | 4,93                | 22          | 19,80               | 42          | 61,32                |
| + 2         | 5,30                | 23          | 21,03               | 43          | 64,62                |
| + 3         | 5,69                | 24          | 22,33               | 44          | 68,07                |
| + 4         | 6,11                | 25          | 23,71               | 45          | 71,68                |
| + 5         | 6,56                | 26          | 25,16               | 46          | 75,46                |
| + 6         | 7,03                | 27          | 26,68               | 47          | 79,41                |
| + 7         | 7,53                | 28          | 28,28               | 48          | 83,54                |
| + 8         | 8,06                | 29          | 29,96               | 49          | 87,85                |
| + 9         | 8,62                | 30          | 31,73               | 50          | 92,35                |
| + 10        | 9,22                |             |                     |             |                      |

En se servant de l'hygromètre de Crova, on fera bien d'attendre la disparition du point de rosée ; ce qui a lieu à une température  $t_2$  légèrement différente de  $t_1$  ; et on prendra

la moyenne  $\frac{t'_1 + t'_2}{2} = t'$  pour la chercher dans les tables : d'où  $f$ . Le tube de laiton devra être d'une très grande pureté afin que l'eau mouille <sup>(1)</sup>.

Connaissant la tension  $f$ , on peut calculer le poids de vapeur d'eau renfermée dans un mètre cube d'air ; on l'évalue en grammes. C'est l'état *hygrométrique absolu*, tandis que  $\frac{f}{F} = e$  désigne l'état *hygrométrique relatif*.

Or le poids d'un litre de gaz ou de vapeur est égal à  $1^{\text{er}}, 293$  (poids du litre d'air) multiplié par la densité de ce fluide. On tient aussi compte de la pression et de la température en écrivant :

$$p = 1,293 \times d \times \frac{H}{(1 + \alpha t) \times 760}.$$

Pour la vapeur d'eau  $d = 0,622$ , environ  $\frac{5}{8}$ ;  $H = f$ . Donc :

$$p = 1,293 \times \frac{5}{8} \times \frac{f \times 273}{(273 + t) 760},$$

ou en simplifiant :

$$p = \frac{0,2902 \times f}{273 + t},$$

soit par mètre cube :

$$(1) \quad p = \frac{290,2 \times f}{273 + t}.$$

Sachant d'ailleurs que  $e = \frac{f}{F}$  ou  $f = Fe$ , on pourra écrire :

$$(2) \quad p = \frac{290,2 \times F \times e}{273 + t}.$$

265. L'usage du *psychromètre*, très répandu encore, est des plus fâcheux ; c'est un instrument certainement faux qu'il faut se résoudre à abandonner. Si nous en donnons la

(1) Cantor (*Wied. Ann.*, t. LVI, p. 492 ; 1895).

technique, c'est afin que là où il existe seul on puisse en tirer quelque parti. Il comprend deux thermomètres, l'un *sec*, l'autre *mouillé* grâce à un morceau de mousseline qui en entoure le réservoir et qui reçoit de l'eau venant par une mèche de coton qui plonge dans un tube. L'évaporation de cette eau refroidit le réservoir et le porte à une température  $\theta$  inférieure à celle de l'atmosphère  $t$  (fig. 239).

On cherche la tension  $F'$  correspondant à  $\theta$ , et on note la pression atmosphérique  $H$ . La tension  $f$  sera :

$$f = F' - AH (t - \theta).$$

$A$  est la *constante* du psychromètre. Il faut se servir d'un hygromètre pour la déterminer ; celui-ci donnant  $f$ , on écrira :

$$A = \frac{F' - f}{H (t - \theta)}.$$

Il est inutile de donner le principe de cet instrument, principe qui est, du reste, entaché d'une grande imprécision. Mais disons que la valeur de  $A$  est loin d'être constante ; elle varie avec la vitesse du vent, le rayonnement des murs, le lieu même de l'observation. Le psychromètre est inutilisable au-dessous de  $0^\circ$ .

Si on peut *fronder* l'instrument pour donner à l'air une grande vitesse, on pourra écrire en général :

$$A = 0,00082 \text{ pour } \theta \text{ supérieur à } 0^\circ ;$$

$$A = 0,00069 \text{ pour } \theta \text{ inférieur à } 0^\circ.$$

*Exemple.* — Le thermomètre sec marque  $20^\circ$ , soit  $t = 20^\circ$ .

Le thermomètre mouillé indique  $16^\circ$ , et  $H = 758$  millimètres. On prendra  $A = 0,00082$ . Comme à  $16^\circ$ , on a  $\theta = 16^\circ$  et  $F' = 13,63$ , on écrira :

$$f = 13,63 - 0,00082 \times 758 \times 4 = 11^{\text{mm}},16.$$

La tension maxima correspondant à  $20^\circ$  est  $17^{\text{mm}},52$ . Donc

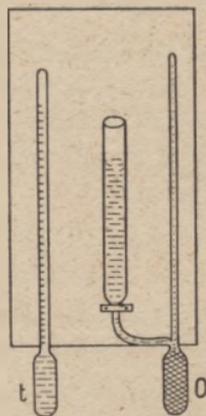


FIG. 239. — Psychromètre.

l'état hygrométrique est :

$$\frac{11,16}{17,52} = 0,637.$$

266. **Frottements.** — Quelques indications concernant les coefficients de frottements (§ 41) paraissent nécessaires. On ne possède, à cet égard, que des valeurs un peu anciennes.

COEFFICIENTS  $f$  DE GLISSEMENT

| Nature des corps frottants.                  | Valeur de $f$<br>pendant le mouvement. |
|--|--|
| Grès sur grès uni à sec.....                 | 0,71 (Rennie)                          |
| Calcaire dur poli sur calcaire dur poli..... | 0,58 (Rondelet)                        |
| Granit dressé sur granit bouchardé.....      | 0,66 (Rennie)                          |
| Caisse en bois sur pavé.....                 | 0,58 (Régnier)                         |
| — sur terre battue.....                      | 0,33 (Hubert)                          |
| Fer sur fer ou fonte, à sec.....             | 0,18 (Divers)                          |
| Fonte sur fonte, à sec.....                  | 0,15 —                                 |
| Fer sur glace (patins).....                  | 0,02 (Müller)                          |
| Métal sur métal, avec enduit gras.....       | 0,10 (Divers)                          |
| Courroies de cuir sur métaux (à sec).....    | 0,56 —                                 |
| — — (graissées)..                            | 0,23 —                                 |

Les valeurs de ce coefficient sont modifiées par l'emploi de *lubrifiants*, huiles et suifs notamment. Elles augmentent avec la vitesse<sup>(1)</sup>. D'ailleurs, l'état des surfaces frottantes est si mal défini que la concordance des mesures ne saurait être satisfaisante.

Le frottement est *plus grand au démarrage* qu'en cours de marche, surtout aux faibles vitesses.

267. Dans le *roulement* des corps cylindriques (roues, rouleaux, roulettes), la valeur du frottement est bien plus faible que dans le glissement. Il faut, pour le vaincre, un effort proportionnel à la pression du corps et inversement propor-

(1) Rennie (*Phil. Trans.*, 1829); — Morin (*Mém. sav. étr.*, t. V, VI); — Jenkin (*Journ. de Physique*, 1<sup>re</sup> ser., t. VI); — Müller (*Pogg. Ann.*, t. CXXXIX, 1870); — Kimball (*Amer. Journ.*, 1877); — *Bulletin technol. des Anc. et Métiers*, 1895, p. 657; 1897, p. 1228.

tionnel au rayon. On suppose que cet effort agit au centre (cas des roues) ou tangentiellement à la surface.

Nous avons indiqué quelques valeurs du coefficient  $\varphi$  relatives aux roues ordinaires (§ 41).

Avec des rouleaux de fonte roulant sur des plaques de fonte ou de fer forgé, on a obtenu <sup>(1)</sup> :

$$\varphi = \frac{0,0039}{\sqrt{r}} \quad \text{et} \quad \varphi = \frac{0,0044}{\sqrt{r}},$$

$r$  étant le rayon en centimètres.

Avec des rouleaux d'acier sur fonte ou sur acier :

$$\varphi = \frac{0,0045}{\sqrt{r}} \quad \text{et} \quad \frac{0,0039}{\sqrt{r}}.$$

Enfin, si des rouleaux de fer forgé prennent contact sur des plaques de fonte, on aura :

$$\varphi = \frac{0,0075}{\sqrt{r}}.$$

Plus utile, sans doute, est la notion de *coefficient de traction*, déjà définie (§ 41). On a trouvé, dans les conditions normales :

| Nature des corps frottants.                     | Coefficient de traction. |
|---|--------------------------|
| Roues de fer sur rails de fer.....              | 0,005                    |
| — ou cerclées de fer sur routes nationales..... | 0,030                    |
| Les mêmes sur pavés.....                        | 0,015                    |
| Les mêmes sur route empierrée.....              | 0,040                    |
| — — non empierrée.....                          | 0,068                    |

**268. Table des sinus et tangentes.** — Nous rappelons que le cosinus d'un angle est égal au sinus de l'angle complémentaire (deux angles dont la somme vaut 90° sont dits complémentaires), et que :

$$\text{tang } \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}.$$

(1) John Perry : *Méc. appliquée*, I, p. 82; Hermann, 1913

| DEGRES | SINUS | TANGENTES | DEGRES | SINUS | TANGENTES |
|--------|-------|-----------|--------|-------|-----------|
| 1      | 0,017 | 0,017     | 46     | 0,719 | 1,036     |
| 2      | 0,035 | 0,035     | 47     | 0,731 | 1,073     |
| 3      | 0,052 | 0,052     | 48     | 0,743 | 1,111     |
| 4      | 0,070 | 0,070     | 49     | 0,755 | 1,151     |
| 5      | 0,087 | 0,088     | 50     | 0,766 | 1,192     |
| 6      | 0,105 | 0,105     | 51     | 0,777 | 1,236     |
| 7      | 0,122 | 0,123     | 52     | 0,788 | 1,281     |
| 8      | 0,139 | 0,141     | 53     | 0,799 | 1,328     |
| 9      | 0,157 | 0,159     | 54     | 0,809 | 1,377     |
| 10     | 0,174 | 0,177     | 55     | 0,819 | 1,429     |
| 11     | 0,191 | 0,195     | 56     | 0,829 | 1,483     |
| 12     | 0,208 | 0,213     | 57     | 0,839 | 1,541     |
| 13     | 0,225 | 0,231     | 58     | 0,848 | 1,601     |
| 14     | 0,242 | 0,250     | 59     | 0,857 | 1,665     |
| 15     | 0,259 | 0,268     | 60     | 0,866 | 1,733     |
| 16     | 0,276 | 0,287     | 61     | 0,875 | 1,805     |
| 17     | 0,293 | 0,306     | 62     | 0,883 | 1,882     |
| 18     | 0,309 | 0,325     | 63     | 0,891 | 1,964     |
| 19     | 0,326 | 0,345     | 64     | 0,899 | 2,052     |
| 20     | 0,342 | 0,364     | 65     | 0,906 | 2,146     |
| 21     | 0,359 | 0,384     | 66     | 0,914 | 2,248     |
| 22     | 0,375 | 0,404     | 67     | 0,921 | 2,358     |
| 23     | 0,391 | 0,425     | 68     | 0,927 | 2,477     |
| 24     | 0,407 | 0,445     | 69     | 0,934 | 2,607     |
| 25     | 0,423 | 0,467     | 70     | 0,940 | 2,750     |
| 26     | 0,439 | 0,488     | 71     | 0,946 | 2,907     |
| 27     | 0,454 | 0,510     | 72     | 0,951 | 3,081     |
| 28     | 0,470 | 0,532     | 73     | 0,956 | 3,274     |
| 29     | 0,485 | 0,555     | 74     | 0,961 | 3,481     |
| 30     | 0,500 | 0,578     | 75     | 0,966 | 3,736     |
| 31     | 0,515 | 0,601     | 76     | 0,970 | 4,016     |
| 32     | 0,530 | 0,625     | 77     | 0,974 | 4,337     |
| 33     | 0,545 | 0,650     | 78     | 0,978 | 4,711     |
| 34     | 5,559 | 0,675     | 79     | 0,982 | 5,152     |
| 35     | 0,574 | 0,701     | 80     | 0,985 | 5,681     |
| 36     | 0,588 | 0,727     | 81     | 0,988 | 6,326     |
| 37     | 0,602 | 0,754     | 82     | 0,990 | 7,130     |
| 38     | 0,616 | 0,782     | 83     | 0,992 | 8,164     |
| 39     | 0,629 | 0,810     | 84     | 0,994 | 9,541     |
| 40     | 0,643 | 0,839     | 85     | 0,996 | 11,468    |
| 41     | 0,656 | 0,870     | 86     | 0,997 | 14,361    |
| 42     | 0,669 | 0,901     | 87     | 0,998 | 19,188    |
| 43     | 0,682 | 0,933     | 88     | 0,999 | 28,640    |
| 44     | 0,695 | 0,966     | 89     | 0,999 | 57,290    |
| 45     | 0,707 | 1,000     | 90     | 1,000 | $\infty$  |



## LIVRE VI

# LE TRAVAIL PROFESSIONNEL

---

### CHAPITRE I

#### ÉQUILIBRE ET MOUVEMENT DU CORPS HUMAIN : LOCOMOTION

**269. Généralités.** — L'étude du travail professionnel est double : elle doit considérer l'équilibre et le mouvement du corps humain ; elle doit aussi déterminer l'influence du bon outillage. C'est à la première de ces deux questions que nous nous attacherons presque exclusivement.

Le corps humain est un système articulé dont les différentes parties ne se lient pas d'une façon immuable formant un tout rigide, comme le serait une statue de marbre. D'ailleurs il n'est jamais en *repos* ; rien que le mouvement de la respiration et de la circulation trouble à chaque instant ce repos <sup>(1)</sup>, et en outre, l'état vibratoire des muscles, toujours plus ou moins contractés, lui imprime une série d'oscillations que traduirait une plume inscrivante reliée au sommet de la tête <sup>(2)</sup>, ou encore la rupture d'équilibre qui se produirait périodiquement sur une balance sensible si on pesait le sujet. Ces mouvements ont été retrouvés optiquement par Reys sur la tête, mais il n'a point compris ceux de la vibration musculaire, ralentie par le poids de l'organe considéré et par la fatigue <sup>(3)</sup>.

Quoi qu'il en soit, le corps humain est un système matériel soumis aux forces extérieures, dont la plus importante est la *pesanteur*, et aux forces intérieures des muscles. C'est de plus un corps *hétérogène*, dans lequel les masses de volumes égaux ne sont pas égales partout ; sa *forme* n'est pas régulière et rappelle de loin celle d'un prisme ; enfin il n'est pas isolé dans l'espace, mais posé à la surface de la terre par

<sup>(1)</sup> A. Mosso (*Arch. ital. biol.*, t. V ; 1884).

<sup>(2)</sup> Vierordt (*Grundriss d. Physiol. d. Menschen.*, p. 364, 1862 : 2<sup>e</sup> édit.).

<sup>(3)</sup> J.-H.-O. Reys (*Arch. Néerland. Physiol.*, 1921, t. VI, p. 197).

une base, celle des *pieds*. C'est à un tel système que les lois de la mécanique générale ont été — à bon droit — appliquées, et de nombreux savants ont pu établir une statique et une dynamique du corps humain <sup>(1)</sup>.

**270. A) Statique du corps humain.** — Tout d'abord le corps humain est, dans toutes ses parties, sous l'action de la pesanteur; son centre de gravité, qu'on ne saurait déduire de sa forme, est donné par l'expérience: si on dispose sur le rebord d'une table une planche sur laquelle est étendu un homme nu, en avançant peu à peu cette planche, il y aura un moment où elle sera en équilibre; le centre de gravité sera situé dans le plan vertical passant par cette arête; en réalisant cet équilibre pour deux autres positions, on aura trois plans se coupant au centre cherché (Borelli, 1679). Il est clair que la position du centre de gravité dépend de la répartition des masses, c'est-à-dire de l'attitude du corps. Otto Fischer considère, à ce point de vue, les centres de gravité des diverses pièces du corps, prises dans des positions respectives connues, et les compose en un point unique (voir § 22). Il emploie, à cet effet, des cadavres congelés.

Supposons l'homme dans la station *debout*; les segments de son corps, la double courbure de la colonne vertébrale et sa forme pyramidale, conduisent à un équilibre, cependant assez *instable* pour que les muscles aient besoin, à tout instant, de le rétablir; cette instabilité tient à ce que la base de sustentation (§ 23) est petite et le centre de gravité assez haut. D'après Braune et Fischer, ce centre, dans la station debout et au repos, se trouve au niveau supérieur de la troisième vertèbre sacrée, ou de l'ombilic.

<sup>(1)</sup> Nombreux sont les auteurs que ce sujet a occupés; nous mentionnerons les plus intéressants à lire parmi eux; ce sont: Giraud-Teulon (*Principes de Mécanique animale*, Paris, 1858), Pettigrew (*Animal Locomotion*, London, 1873), Marey (*la Machine animale*, Paris, 1873; *le Mouvement*, 1894, Paris). Du Bois-Reymond (*Specielle Muskelphysiologie, oder Bewegungslehre*, Berlin, 1903), Otto Fischer (*Theoretische Grundlagen für eine Mechanik der lebenden Körper*, Leipzig, 1906; *Beiträge zur Muskelstatik und Muskeldynamik*, dans *Abhandl. d. Sachs. Gesell. d. Wiss., Math-Phys. cl*, t. XXII et XXIII : 1895-1897), Jules Amar (*Rev. de chirurg.*, mai-juin 1918). L'œuvre de Fischer est d'une belle tenue mathématique.

Anatomiquement, la station debout est *symétrique* ou bien *asymétrique*; la première est celle où le corps est droit, les talons joints, avec la ligne de gravité passant vers le talon (attitude normale ou *Normal-Stellung*, de Braune et Fischer),

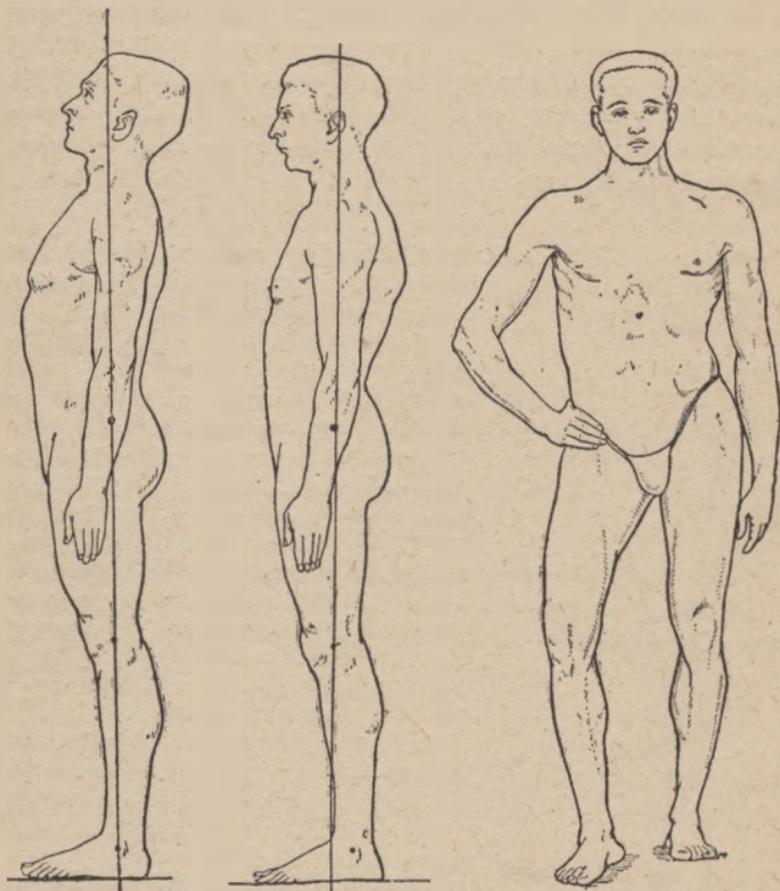


FIG. 240. Attitude normale.  
Stations symétriques.

FIG. 241. Attitude commode.

FIG. 242. Station hanchée ou station asymétrique.

ou en avant du talon (attitude commode ou *Bequeme-Haltung*); la seconde est dite *station hanchée* (fig. 240 à 242). Dans les stations symétriques, normale ou commode, le corps pèse également sur les deux jambes; on peut y considérer un plan *frontal* passant par les centres des articulations des

hanches, il sera normal au plan *médian* du corps. Braune et Fischer montrent que si toutes les articulations du pied, du genou, de la cuisse, viennent occuper ce même plan frontal, la ligne de gravité est rejetée vers le talon ; il en est ainsi dans l'attitude militaire ou *normale* ; mais si l'homme se tient *commodément*, l'articulation du pied sera en arrière du plan frontal, la ligne de gravité passera en avant du talon et la stabilité du corps sera plus grande. Enfin, dans la station hanchée, le poids du corps porte sur une seule jambe, l'autre servant à assurer l'équilibre.

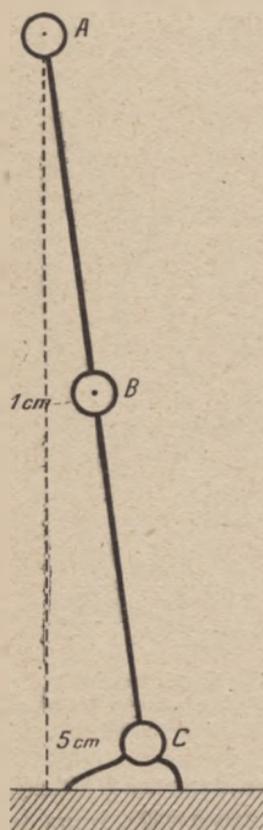


FIG. 243.

271. Les deux savants allemands ont étudié <sup>(1)</sup>, au point de vue de la position du centre de gravité des segments du corps, un sujet pesant 58<sup>kg</sup>,400, en effectuant leurs mesures sur les données photographiques. Ils arrivent aux résultats analytiques suivants :

Dans l'attitude commode, ou *Bequeme-Haltung*, le centre de gravité de la tête est placé à 5 millimètres en avant de l'articulation atlanto-occipitale, d'où une certaine surcharge antérieure et légèrement latérale ; elle explique le rôle des muscles de la nuque dans le maintien de l'équilibre, et ce fait banal que la tête s'incline sur la poitrine pendant le sommeil.

Le *tronc* forme une masse pour ainsi dire mobile autour d'un axe transversal passant aux articulations des hanches ; il porte les deux bras, tombant verticalement, et dont les masses se composent avec la sienne (222) pour donner un centre de gravité commun (tête et bras compris) situé à 18 centimètres au-dessus de l'axe des hanches, et à 8<sup>mm</sup>,6 en arrière du plan frontal. Tout le buste est donc sollicité par un mouvement de rotation  $\mathcal{M} = P \times 0,0086$ . Le poids  $P$  est de 36<sup>kg</sup>,820 chez le sujet considéré ; il se décompose ainsi :

(1) Braune et Fischer (*Abhandl...*, t. XV, n° 7, pp. 631 et 635).

|                 | Du poids total du corps |                               |
|-----------------|-------------------------|-------------------------------|
| Tête . . . . .  | 4 <sup>ks</sup> ,140    | ou 7,10 0/0                   |
| Tronc . . . . . | 25 ,060                 | 42,92                         |
| Bras' . . . . . | 3 ,810                  | 6,52 (dont 3,14 = avant-bras) |
| — . . . . .     | 3 ,810                  | 6,52                          |
| Buste . . . . . | 36 <sup>ks</sup> ,820   | 63,06 0/0                     |

Mais le buste demeure droit grâce aux muscles de la cuisse et de l'abdomen (psoas iliaque, tendeur du fascia lata, ligament de Bertin) ; il transmet son poids, 63 0/0 de celui du corps, aux hanches, et comme il agit en arrière, il tend à pousser les cuisses par leurs extrémités inférieures B (fig. 243), et celles-ci pressent sur les articulations des genoux qui se tendent ; de sorte que, loin de fléchir sous le poids, les genoux se redressent et résistent à la pression. Dans la station commode, les articulations des hanches et des genoux sont distantes de 1 centimètre, et la tension que produit le poids du buste est telle que les genoux sont dépourvus de raideur ; on peut toucher l'os de la rotule ; ce petit disque est absolument lâche, tandis que, au contraire, les muscles du mollet, les ligaments du genou sont fortement tendus (1).

Le même fait a lieu à l'articulation du pied qui reçoit la poussée de la jambe supportant à son extrémité supérieure le poids du buste et de la cuisse. Dans la station commode, l'articulation pédieuse du tibia est à 5 centimètres en arrière du plan frontal, c'est-à-dire à 4 centimètres de celle du genou, et ce sont les muscles soléaires qui doivent équilibrer le moment de rotation du poids considéré. On a :

|                            |                       |    |           |                   |
|----------------------------|-----------------------|----|-----------|-------------------|
| Cuisse . . . . .           | 6 <sup>ks</sup> ,800  | ou | 11,64 0/0 | du poids du corps |
| Jambe et pied . . . . .    | 3 ,990                | ou | 6,83      | —                 |
| Membre inférieur . . . . . | 10 <sup>ks</sup> ,790 |    | 18,47 0/0 |                   |

soit, pour l'ensemble des membres inférieurs, 21<sup>ks</sup>,580 ou 36,94 0/0 du poids total du corps. Les muscles soléaires équilibrent donc un moment de rotation produit par un poids de :

$$36,820 + (6,800) 2 = 50<sup>ks</sup>,420,$$

le bras de levier étant de 4 centimètres environ.

D'autre part, le tendon d'Achille tire le talon vers le haut et c'est, en définitive, une pression de la pointe des pieds sur le sol, une réaction égale du sol, qui traduisent l'effet total du poids du corps. Et tout le temps que la ligne de gravité de l'ensemble tombe dans la base de sustentation des pieds, il y a équilibre : la station debout est possible.

(1) Haycraft, *Animal Mechanics*, in *Schäfers Textbook of Physiology*, t. II, p. 228 ; 1900.

Nous avons pris l'empreinte des pieds sur une platine de cire spéciale (le *Stent* des dentistes). Au repos, on constate que talon, bord externe, 5<sup>e</sup>, 4<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> orteils forment un *socle* qui cale le pied, et lui sert de base d'appui. Le gros orteil est peu actif.

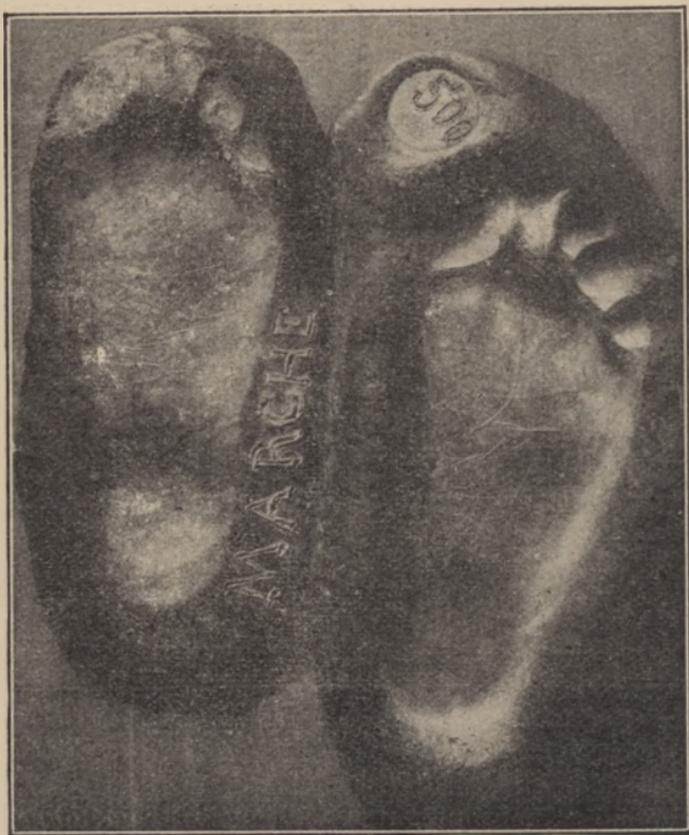


FIG. 244. — Empreinte des pieds.

Au contraire, dès qu'on marche, ce gros doigt, son métatarsien, et le bord interne du talon, interviennent pour assurer l'équilibre.

En évaluant les pressions en chaque point de la surface plantaire, par comparaison avec un poids de 500 grammes posé sur la cire, nous trouvons que la voûte d'appui supporte très inégalement la pression du corps, 30 kilogrammes sur chaque jambe dans la station symétrique. Métatarse, talon et bord externe sont les plus chargés (fig. 244) et leur disposition assurerait la station *unipède* (1).

(1) Jules Amar (*C. R. Acad. Sc.*, 1918, t. CLXVI, p. 651 ; — *Revue de chirurgie*, mai-juin 1918).

272. Attitudes économiques du corps humain. — Dans la station debout, la base de sustentation est limitée par le contour des pieds, talons joints ou écartés. Le corps sera en équilibre si la ligne de gravité ne sort pas de cette base, et il est d'autant

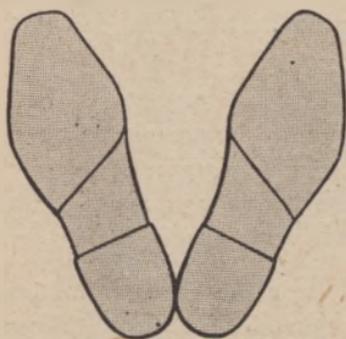


FIG. 245. — Base d'appui des pieds.

plus stable que cette ligne passera plus près du centre du polygone de sustentation. Mais le corps peut déjà basculer alors que la ligne de gravité est à 1<sup>cm</sup>,50 en deçà des bords des pieds (1). Quand les talons sont joints, la base est plus développée en direction sagittale que transversale (fig. 245), mais le corps est peu stable, il oscille beaucoup (2), de sorte que ni la

station normale *militaire*, ni la station dite commode, ne sont réellement les plus économiques.

Tout autre la station asymétrique, dans laquelle les talons sont écartés pour augmenter la base d'appui, et le poids du corps supporté par une seule jambe ; c'est véritablement l'attitude *naturelle* de l'homme ; elle n'entraîne que de très faibles oscillations ; le centre de gravité du corps est à peu près exactement au-dessus de la jambe qui appuie et dans la direction de l'articulation du pied ; il s'ensuit que les muscles du mollet ne travaillent pas beaucoup, et généralement ils sont relayés, une des jambes prenant la place de l'autre. Entre la station normale, du soldat au « garde à vous », et la station naturelle, du repos vrai, *l'économie*, évaluée d'après l'oxygène consommé, atteint 22 0/0, ce qui est d'une extrême importance (3) quant aux applications.

Dans la station *assise*, la base d'appui est augmentée et avec elle la stabilité du corps ; en outre, les muscles ont un rôle très peu actif ; mesurant la dépense d'oxygène d'un

(1) R. du Bois-Reymond (*loc. cit.*).

(2) Leiterstofer. *Das militärische Training usw.*, Stuttgart, 1897.

(3) Zuntz et Katzenstein (*Pflüger's Arch.*, t. XLIX, p. 361 ; 1891) — ; — Widburg a même obtenu 26 0/0 (*Skand. Arch. f. Physiol.*, t. XVII ; 1905).

adulte, tantôt debout en station commode (Bequeme), tantôt assis sur une chaise, ne contractant pas les muscles des jambes et s'appuyant au dossier, nous avons trouvé que ce second cas réalise une économie de 6 0/0 en moyenne, d'après la consommation d'oxygène (4).

Si donc nous comparons entre elles les attitudes décrites, nous aurons approximativement :

|   |                          |     |
|---|--------------------------|-----|
| Dépense d'énergie d'un homme <i>assis</i> ..... | 100                      |     |
| Dépense d'énergie<br>d'un homme <i>debout</i> . | Station hanchée (2)..... | 103 |
|   | Station commode.....     | 106 |
|   | Station normale.....     | 125 |

On voit que, pour le maximum de repos de l'homme, il convient de lui donner la position assise, dans les conditions habituelles; mais il est clair aussi que *l'attitude couchée* procure une base d'appui bien plus grande au poids du corps, lorsque celui-ci est étendu sur un lit et que les muscles sont relâchés. On a trouvé que, dans cette position couchée, les muscles parfaitement au repos, l'économie atteint 7 à 8 p. 100 sur la dépense d'énergie du sujet assis (3), et plus en pronation qu'en supination du corps (4). Mais, pour des raisons de solidarité, de distraction, il faut que l'ouvrier puisse s'asseoir auprès de ses camarades pendant leurs heures de repos.

Les attitudes professionnelles, sportives (boxe, escrime), modifient la position du centre de gravité (5), toujours d'après le principe d'une égale répartition des masses (§ 22), et en vue d'accroître la base de sustentation, car celui-là est le plus ferme sur ses pieds qui adopte — ou possède naturellement — la base la plus étendue : il pourra faire des mouvements plus amples sans tomber. Un homme chargé de fardeaux (*fig. 246*), un obèse, un bossu, un vieillard courbé, une femme enceinte, ont la ligne de gravité déplacée du côté de

(1) Jules Amar (*Journ. de Physiol.*, mars 1911, p. 212).

(2) C'est une valeur moyenne entre 100 et 106.

(3) Emmes et Riche (*Amer. Journ. Physiol.*, t. XXVII, p. 406; 1911).

(4) Liljstrand et Wollin (*Skand. Arch. f. Physiol.*, t. XXX, p. 199; 1913).

(5) Braune et Fischer (*loc. cit.*); Dèmeny (*Comptes Rendus Sciences*, 10 octobre 1887).

la surcharge. C'est un point de vue qui n'échappe pas aux peintres. Harless et Meyer ont trouvé que le centre de gravité du corps est *plus bas* chez la femme que chez l'homme; et il y a, pendant la grossesse, un ploïement en arrière de toute la région lombaire qui résiste à la traction de l'utérus. L'inclinaison la plus



FIG. 246. — Equilibre de l'homme chargé.

grande que puisse prendre le corps, talons joints, est moindre, évidemment, que celle où les talons s'écartent (fig. 247). Pour se tenir droits, les bossus se renversent lé-

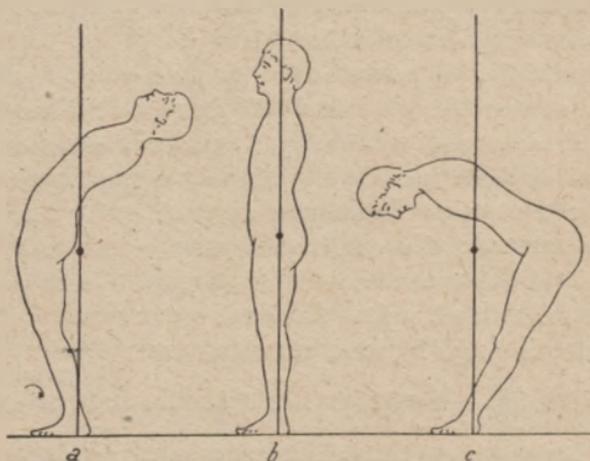


FIG. 247. — Déplacements de la ligne de gravité du corps (d'après Braune et Fischer).

gèrement en arrière; les obèses tournent en marchant, et, pour réduire l'amplitude de ces rotations, ils se raidissent et font de petits pas; les vieillards recourent au bâton, et dans tous ces cas, les efforts sont sensibles et entraînent assez rapidement la fatigue. Nous avons étudié ailleurs (*loc. cit.*) la *statique pathologique* et celle des amputés.

Du côté professionnel, un coup d'œil sur un chantier montrera l'apprenti en station très hanchée pour soutenir une charge, le cycliste (*fig.* 248) penché sur sa base d'appui, le boxeur, l'escrimeur, le soldat ayant sac et fusil, gouvernés par le principe d'équilibre invoqué déjà; mais ici l'équilibre est de plus en plus contraint et nécessite une dépense statique d'énergie supérieure aux valeurs qui correspondent au repos.



FIG. 248. — Équilibre du cycliste.

Par exemple, le soldat au « garde à vous », arme sur l'épaule, sac au dos, est loin d'être au repos ; il lui est même impossible de prendre une attitude *moins économique*. L'excès contraire se présente dans la station asymétrique caractérisée par le rejet de l'abdomen en avant pour que le buste pèse en arrière ; elle est économique — moins cependant que la station hanchée, — mais combien aux dépens de l'harmonie. Elle est même fâcheuse pour la santé <sup>(1)</sup>, et l'on doit porter le corps légèrement en avant.

**273. Résumé.** — Les déterminations de Braune et Fischer placent le centre de gravité du corps aux  $\frac{57}{100}$  de la hauteur environ ; celui du buste à 18 centimètres à peu près au-dessus de l'axe transversal des hanches. Pour un poids du corps égal à 100, le buste représente 63 et les membres inférieurs 37 ; ainsi, étant donné un adulte de 65 kilogrammes, son buste sera de 41 kilogrammes et ses membres inférieurs 24 kilogrammes. La jambe seule pèse, en moyenne, 6,83 0/0 du poids du corps ; la longueur totale du membre inférieur

(1) D'Arsonval, Gautiez, Amar (*C. R. Ac. Sc.* de juin 1920).

de l'adulte est de  $0^m,87$  à  $0^m,90$ , en moyenne  $0^m,88$ , et le poids de 12 kilogrammes, dont  $4^k,400$  reviennent à la jambe.

Ces différentes mesures et proportions nous seront utiles plus tard; elles s'écartent très légèrement des moyennes de Otto Fischer (1).

D'autre part, la dépense d'énergie, trouvée égale à 2.120 Calories par Atwater, sur l'adulte placé dans un milieu à  $20^\circ$ , correspond à  $\frac{2120}{65 \times 24} = 1^{Cal},36$  par kilogramme de poids du corps et par heure (§ 111); dans la *vie libre*, comme nous le verrons, cette valeur atteint  $1^{Cal},50$  (§ 359), eu égard à la température plus basse ( $14$  à  $15^\circ$ ) et à l'état libre qui entraîne une activité statique plus grande de la part des muscles.

274. B) Dynamique du corps humain. — Dès que l'équilibre mécanique du corps est rompu, le mouvement prend naissance. Or ce mouvement résulte de l'application de forces qui peuvent être *intérieures* ou *extérieures*, et supposées transportées au centre de gravité du corps (§ 25). Pour l'effet des forces intérieures, nous savons qu'il ne doit pas modifier la position du centre de gravité; un homme qui serait placé sur un terrain parfaitement poli, sans frottement des pieds, pourrait *tourner sur lui-même*, mais nullement avancer; c'est une rotation autour d'un axe vertical sur lequel le centre de gravité est demeuré invariablement, (§ 29) et ce n'est pas contraire au *théorème des aires*; ainsi, plaçant les bras symétriquement et leur faisant décrire deux cercles dans le même sens, on arrivera à faire faire une révolution complète au corps dans le sens inverse. Mais autrement on n'y arrive pas: lorsque, suspendu à une corde, on vient à étendre le bras dans un sens, on recule dans le sens opposé (2): la somme des moments est nécessairement toujours nulle.

Il n'en est pas de même des forces *extérieures*, dont la

(1) Otto Fischer, *Der Gang des Menschen* (t. XXV, n° 1, p. 16, des *Abhandlungen d. Mathematisch-physischen Classe d. Königl. Sächsischen Gesellschaft. d. Wissensch.*, Leipzig, 1899).

(2) E. Kohlrauch, *Physik des Turnens*, p. 50; 1887.

plus sensible sur les corps naturels est la pesanteur; citons aussi les frottements sur le sol et la résistance de l'air. Un homme qui tomberait d'une certaine hauteur doit décrire une branche de parabole, trajectoire de son centre de gravité. Marey (1) a montré, par la *chronophotographie*, que le corps d'un animal, d'un chat par exemple, peut effectuer



FIG. 249. — Trajectoire du centre de gravité d'un animal (chat) lancé horizontalement.

une rotation complète sous l'empire des forces intérieures que représentent les muscles (fig. 249); le centre de gravité général décrit néanmoins un arc de parabole, et tout se passe comme si la pesanteur s'était exercée sur un solide invariable. Qu'un acrobate, en sautant, puisse tourner autour d'un axe transversal en s'aidant de ses bras (2) et quelque peu de la résistance de l'air, il n'en est pas moins certain que la hauteur, la vitesse et la durée du saut se trouvent liées par la formule  $v = \sqrt{2gh}$ , où  $h = \frac{1}{2}gt^2$  et  $t = \frac{v}{g}$ .

Lorsque la vitesse initiale est inclinée d'un angle  $\alpha$ , nous savons que  $t = \frac{v \sin \alpha}{g}$ , et le corps lancé

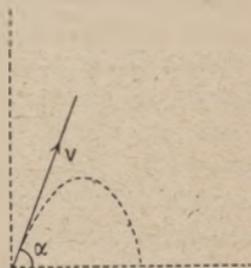


FIG. 250. — Trajectoire du saut.

parvient au sommet d'une parabole (fig. 250).

(1) *Comptes Rendus Sciences*, t. CXIX, p. 714; 1894.

(2) E. Kohlrauch (*loc. cit.*, p. 45). — C'est pourquoi les bons sauteurs ont une musculature des épaules robuste (Murey, *Exposil. intern. univ. de 1900, section 13*, Paris, 1901).

On pourrait déduire des lois du mouvement des projectiles, rigoureusement applicables au corps humain, les conditions qui permettent d'augmenter l'amplitude ou la portée du saut ; on trouve que la direction du sauteur doit faire 45° avec l'horizon, mais l'amplitude est diminuée par la résistance de l'air ; on tombe en deçà du point assigné par le calcul (§ 26).

La pesanteur agit sur chaque segment du corps humain. Par une étude patiente, Otto Fischer a déterminé les centres de gravité de ces différents segments. Mais l'action de la pesanteur est équilibrée, elle est vaincue par l'action des muscles prenant appui à l'extérieur ; il en résulte le mouvement, la *dynamique musculaire* ; le mouvement dépend des *degrés de liberté* quant à sa forme, et de l'intensité des efforts quant à sa vitesse.

**275. Considérations sur le mouvement musculaire.** — Le mouvement des membres supérieurs (bras, avant-bras, mains) et inférieurs (cuisses, jambes, pieds) est le plus utile à examiner. On dit qu'il y a *flexion* quand la contraction musculaire rapproche un segment osseux d'un autre (avant-bras sur le bras, jambe sous la cuisse) ; le mouvement opposé constitue l'*extension*. Quand un membre s'éloigne du corps, il est en *abduction* ; quand ils s'en rapproche, il est en *adduction*. Un membre peut tourner autour de son axe longitudinal, soit en dehors : c'est la *supination* ; soit en dedans : c'est la *pronation*. Ainsi l'avant-bras est en supination quand le dos de la main regarde le sol ; il est en pronation avec la paume tournée vers le sol.

Enfin la liberté de mouvement est telle à l'articulation scapulo-humérale (épaule) ou coxo-fémorale (hanche) que le membre peut décrire des cercles ou arcs de cercles : c'est la *circumduction*. Léonard de Vinci disait il y a plus de quatre siècles : « Les mouvements des épaules sont infinis, car si l'épaule regardant un mur on dessinait avec le bras une figure circulaire, on ferait tous les mouvements qui sont possibles par cette épaule ; de plus, toute quantité continue étant divisible à l'infini, le cercle est une quantité continue due au mouvement du bras, lequel mouvement ne produira pas une quantité continue si lui-même n'est pas continu.

Donc le mouvement du bras a passé par toutes les parties du cercle, et le cercle étant divisible à l'infini, infinies aussi sont les variations (de mouvement) des épaules (1). »

Les degrés de liberté du mouvement sont donnés par la forme des articulations (§ 76), et pour le même type d'articulation la vitesse du mouvement, son amplitude se trouvent déterminées par les longueurs des bras de levier de la puissance et de la résistance, et nous savons que les leviers de la locomotion sont du troisième genre (§ 90) presque exclusivement.

Les plans dans lesquels le mouvement a lieu sont : le plan frontal  $X'ZXZ'$  (fig. 251), le plan horizontal  $XV'X'Y$  et le plan sagittal ou antéro-postérieur  $ZYZ'Z'$ .

On pourra toujours rapporter le mouvement à ces trois plans. L'adduction et l'abduction sont rapportées au *plan médian* du corps, qui est un plan sagittal.

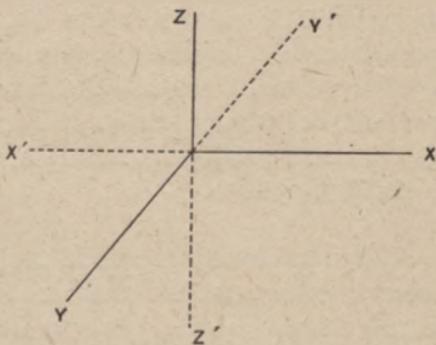


FIG. 251. — Plans d'orientation des membres de l'homme.

276. Pour étudier le mouvement des membres, il faut faire certaines simplifications : 1° admettre que l'axe longitudinal du membre passe par son centre de gravité et le milieu de l'articulation. Otto Fischer reconnut qu'il en est presque ainsi dans la réalité ; 2° réduire la forme de l'articulation à celle d'un ou plusieurs axes parfaitement définis et fixes ; mais souvent les axes subissent un petit déplacement et quittent leur position initiale ; 3° réduire les insertions musculaires à des points pour que le muscle soit représenté par une droite (vecteur force), droite située dans le même plan que l'axe longitudinal du membre ; nous verrons que cette

(1) Leonard de Vinci, *Trattato della Pittura*, p. 107 (ed. de Milan, 1804).

hypothèse ne modifie pas le raisonnement qui aurait pris les données exactes pour base ; 4° étudier le mouvement d'un segment osseux articulé, comme si tout le reste du corps était une masse solide et invariable<sup>(1)</sup>.

Soit, par exemple, un mouvement à un seul degré de liberté celui de l'avant-bras sur le bras, ce dernier étant supposé *vertical*, et fixé pour résister indéfiniment. On représentera alors le muscle biceps par la droite AB (fig. 252) ; il tire sur les points A et B ; mais A est fixe, tandis que B tournerait autour de l'axe qui a pour milieu le point *o*, au coude. Le moment de rotation de la force F (ou AB) par rapport au point *o* est le produit :

$$\mathfrak{M} = F \times od.$$

Mais le segment mobile (avant-bras et main) est sollicité par la pesanteur ; son poids *P*, la résistance, est appliqué en son centre de gravité *G*, et ce poids a pour moment :

$$\mathfrak{M}' = P \times od'.$$

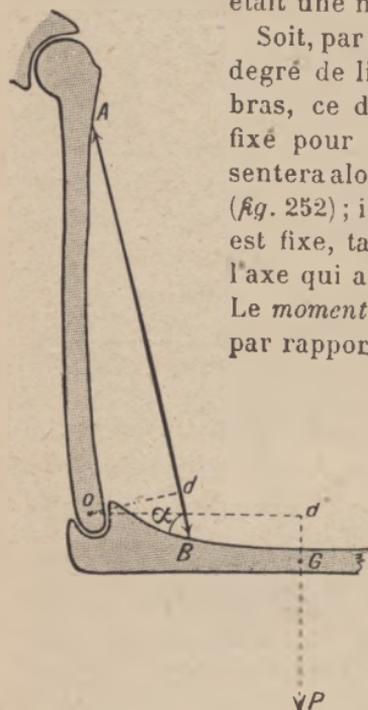


Fig. 252. — Moments de rotation de l'avant-bras.

La flexion ne peut avoir lieu que si le moment moteur  $\mathfrak{M}$  est supérieur au moment résistant  $\mathfrak{M}'$ . L'effort du muscle devra être d'autant plus grand que le bras de levier *od* sera plus court. Or, cela revient à dire que, pour une position donnée, plus le bras ou la distance de l'insertion B à l'articulation est courte, plus il faudra développer de force ; comme d'ailleurs

$$od = oB \sin \alpha,$$

on voit que

$$\mathfrak{M} = F \times oB \sin \alpha,$$

<sup>(1)</sup> Otto Fischer (*Abhandlungen...*, t. XX, 1893 ; XXII, 1895 ; XXIII, 1897).

c'est-à-dire que le moment moteur varie suivant une loi sinusoïdale, donnée par le degré d'inclinaison du muscle sur le segment à déplacer. Au cours des positions de l'avant-bras, l'angle  $\alpha$  prend des valeurs 0 à 180° (extension ou flexion totales), et le sinus la valeur zéro : le moment sera

nul ; pour  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\sin \alpha = \frac{1}{2}$  ;

le moment deviendra maximum quand le muscle tirera *normalement* au segment mobile (fig. 253).

En fait, les têtes articulaires ont des saillies, les tendons s'y insèrent par des surfaces, si bien qu'à aucun instant, pour aucune position, le moment moteur ne devient rigoureusement nul ; il conserve même, d'après Fischer, une valeur importante (1). D'autre part, le muscle n'est pas toujours, même réduit à une droite, dans le plan où le membre se meut ; sa force aura une composante efficace

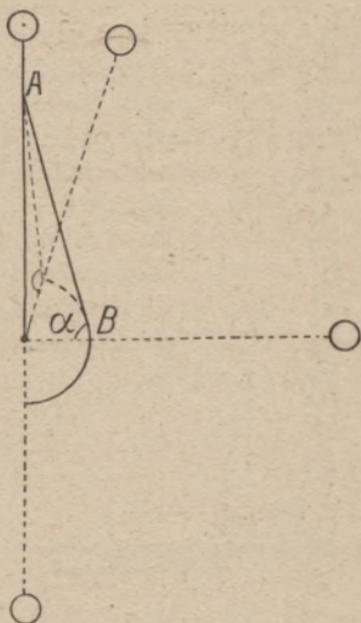


FIG. 253. — Différents degrés de flexion de l'avant-bras.

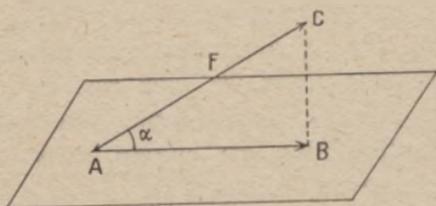


FIG. 254. — AB est la composante de la force musculaire F dans le plan de rotation du membre.

dans ce plan qui sera sa projection sur ce plan, en grandeur et en direction ; ce qui diminue le moment moteur proportionnellement au cosinus directeur  $\alpha$  (voir § 3), et produit une *rotation* du membre, du fait qu'il existe une composante BC hors du plan (fig. 254).

(1) Braune et Fischer *loc. cit.*, t. XV, n° 3, p. 245).

Qu'il y ait un ou plusieurs muscles pour réaliser le mouvement à un degré de liberté, on ne considérera que leur résultante, et nous savons qu'un système de forces peut toujours être ramené à une seule force et à un couple (§ 17); mais cette composition n'est valable que pour une position donnée, vu que les forces changent au cours du déplacement.

Les mouvements à un degré appartiennent aux grandes articulations (avant-bras, jambe, § 77); ils ne peuvent pas s'effectuer dans le sens du couple de rotation, car le mode

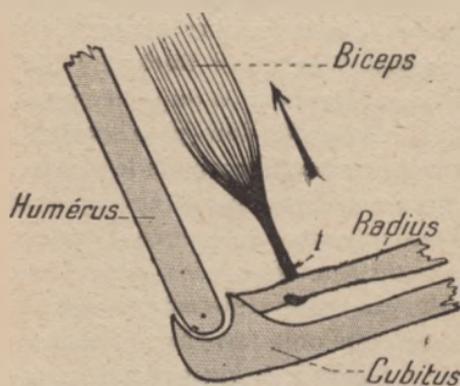


FIG. 255. — Cause de rotation de l'avant-bras.

articulaire s'y oppose; ainsi la composante latérale BC aura un effet sensiblement nul, dans les flexions et extensions. Toutefois l'insertion inférieure *i* du biceps contourne le radius qui porte la main et permet à tout ce segment osseux de tourner en supination (fig. 255); le tendon

a même subi un allongement qui satisfait à ce mouvement (voir les adaptations fonctionnelles, § 89). En général, l'avant-bras fléchit sans tourner; mais, si la main supporte une lourde charge, la flexion n'aura pas lieu avant la rotation qui déroulera le ligament tendineux. R. du Bois-Reymond en donne l'image suivante <sup>(1)</sup>: une bobine est posée sur une table; on tire sur le fil pour le dérouler; si la bobine est légère, elle se laissera tirer sans tourner; si, au contraire, elle est lourde, elle demeurera en place tout en subissant la rotation, et le fil pourra se dérouler. Ce couple de rotation disparaît quand la main est en supination; c'est donc dans cette position que le mouvement musculaire a le plus de simplicité et

(1) R. du Bois-Reymond, *Spezielle Muskelphysiologie oder die Bewegungslehre* (loc. cit.).

conduit au meilleur effet, surtout quand on doit produire de grands efforts.

Rappelons, au sujet des articulations à un axe, que seules méritent réellement ce nom les articulations des doigts (§ 77), tandis que celle du coude est une articulation ovale, appartenant plutôt au deuxième degré. Chauveau a démontré que les muscles fléchisseurs travaillent plus économiquement que les muscles extenseurs (1); la consommation d'oxygène est moindre pour effectuer le même travail; ce savant l'a constaté sur les muscles de l'avant-bras. D'où la supériorité des *escrimeurs gauchers*. Otto Fischer semble l'avoir reconnu, par des évaluations des forces et des longueurs musculaires, dans le mouvement des jambes (Voir aussi Bürker, § 119).

Quand il s'agit d'articulations à trois axes ou sphériques, sans doute il peut y avoir flexion et extension (plan sagittal), adduction (plan frontal) et circumduction; mais le mouvement a plus souvent lieu dans une direction et autour d'un axe déterminés: par exemple, les jambes se meuvent surtout dans le plan sagittal. Il s'ensuit une adaptation si parfaite, un *automatisme* tel que la dépense d'énergie est alors minimum; en toutes circonstances, on doit favoriser *le mode de mouvement le plus habituel à l'homme*, à moins qu'il ne se montre véritablement impropre à l'effet utile.

277. Les muscles commandent, parfois, à des segments deux ou plusieurs fois articulés; ainsi les extenseurs des doigts qui gouvernent ces derniers se prolongent jusqu'au poignet; or, cette disposition pourrait être défavorable au travail; si, par exemple, on fléchit le poignet, les extenseurs se trouvent tendus suffisamment pour ne pouvoir plus permettre aux doigts de fléchir fortement; et il arrive ce fait assez connu qu'on arrache facilement un objet tenu par une main fermée en fléchissant le poignet de son adversaire.

Enfin, le même membre fait intervenir dans son mouvement un groupe musculaire dont la composition peut changer suivant les cas; on se figure que l'avant-bras est nécessairement commandé par les muscles du bras; mais les puissants

(1) A. Chauveau (*Comptes Rendus Acad. Sciences*, 5 octobre 1904).

muscles de l'épaule y contribuent, et, sur ce point précisément, disons que l'articulation du coude travaille dans la traction par les mains, tandis que ce sont les muscles de l'épaule qui effectuent généralement le travail des bras ; l'articulation si mobile du poignet (§ 77) ne subit presque pas d'effort ; elle est d'ailleurs très délicate et convient aux exercices de vitesse bien plus qu'à ceux de force ; la supination et la pronation de la main sont assurées par le radius et non point par les os du poignet, encore que celui-ci ait proprement plusieurs degrés de liberté.

A l'action des muscles qui produisent *effectivement* le mouvement, nous savons que parfois s'ajoute l'action des *antagonistes* (§ 90), et que — Duchenne de Boulogne, Braune et Fischer l'ont établi — c'est à une combinaison d'efforts musculaires que l'on doit de pouvoir déplacer un membre dans une direction et avec une vitesse voulues ; il n'est donc pas suffisant, pour évaluer le travail musculaire dans la flexion de l'avant-bras par exemple, de connaître la force du biceps et la grandeur du déplacement ; il faut aussi connaître le travail du triceps, son antagoniste. La musculature joue sous l'empire d'excitations nerveuses coordonnées ; cette coordination qui règle et nuance les mouvements de l'homme s'oppose à la notion vraiment trop simpliste de l'*antagonie musculaire*. Le rôle des extenseurs, par exemple, n'est pas toujours antagoniste de celui des fléchisseurs. Ainsi, lorsqu'un homme, debout, penche la tête en avant, ce sont les muscles extenseurs qui, seuls, se contractent et guident, par un relâchement graduel, le mouvement de la tête, à la vitesse voulue.

D'ailleurs les muscles, loin de s'opposer, combinent leur action. Veut-on *lever* les bras ? — C'est aux abducteurs, adducteurs et releveurs à intervenir, les premiers aidant à porter les bras soit en avant soit en arrière. Veut-on *abaisser* les mêmes membres ? — C'est alors aux muscles abaisseurs à agir, non point comme antagonistes des releveurs, mais comme modérateurs du mouvement de chute. Le biceps brachial n'est pas, d'autre part, un fléchisseur exclusivement ; c'est également un muscle supinateur dont on sent le gonflement quand on tourne une grosse clef. — Le droit anté-

rieur n'est pas seulement un extenseur de la jambe : c'est aussi un fléchisseur et releveur de la cuisse, et il sert à maintenir l'équilibre des hanches... Les modalités de l'activité musculaire sont nombreuses. Il tombe sous le sens que ces différentes actions sont exactement totalisées dans la dépense énergétique, une des données capitales pour déterminer ce qu'on a appelé « le degré de fatigue » :

Au point de vue industriel, le mouvement doit être approprié à l'effet maximum et s'effectuer avec la moindre dépense énergétique. Souvent des déplacements étendus du membre mobile ne sont pas nécessaires ; on doit alors les éviter pour ne pas mettre en action des muscles qui étaient au repos. Les professions les plus variées comprennent ainsi, à côté des *mouvements utiles*, d'autres qui sont *superflus* et dont la suppression serait une source d'économies. Les *sports*, en particulier la boxe et l'escrime, sont logés à la même enseigne, mais les mouvements inutiles sont ici en grande partie connus, et les bons athlètes les évitent, parce qu'il y va de la réputation et, parfois, de la vie de ceux qui ne les évitent pas.

**278. Mouvement des segments du corps : centres de gravité et moments d'inertie.** — Otto Fischer détermina la position des centres de gravité dans les divers segments du corps et les proportions de ces segments ; les membres supérieurs et inférieurs, la tête, le tronc ont des centres de gravité que l'on rapporte à une origine commune : la ligne des articulations des épaules ou celle des hanches. Mais il va de soi que les valeurs trouvées constituent des *moyennes* et ne s'appliquent pas à un sujet en particulier. Si, d'autre part, nous assimilons le tronc à un volume cylindrique et les membres à des volumes tronconiques, nous pourrons en calculer les *moment d'inertie*  $I = M\rho^2$ , où  $M$  désigne la masse  $\frac{P}{g}$  et  $\rho$  le *rayon de gyration* (voir § 33).

Nous prendrons à titre de première approximation les données suivantes pour un adulte de 65 kilogrammes :

1° *Buste* (tronc + tête) ; poids = 50 0/0 du tout, ou  $\frac{65}{2} = 32^s,500$ . Le centre de gravité se trouve à 0<sup>m</sup>,32 environ

de la ligne des hanches ; comme dimensions, ce serait un cylindre de 0<sup>m</sup>,88 de haut et 0<sup>m</sup>,13 de rayon (fig. 256).

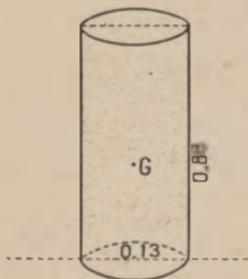


Fig. 256.

Le moment d'inertie sera :

$$I = \frac{M}{12} (3r^2 + 4h^2) = 0,86.$$

3° Bras : poids = 2<sup>k</sup>,20 ; le centre de gravité est à 0<sup>m</sup>,145 du centre d'articulation de l'épaule. Prenons :

$$h = 0^m,35 ;$$

et assimilant le segment à un tronc de cône, on posera :  $r = 0^m,047$ ,  $r' = 0^m,04$ .

Appliquant la formule du moment d'inertie, on aura :

$$I = M \left[ \frac{h^2}{g} \left( 1 + \frac{d}{r+r'} \right) + \frac{(r+r')^2 - 2d^2}{16} \right] = 0,0033.$$

3° Avant-bras :  $M = \frac{2^k,04}{g}$  ;  $h = 0^m,35$  ;  $r = 0^m,045$  ;  $r' = 0^m,027$ . Le centre de gravité est à 0<sup>m</sup>,54 du centre d'articulation de l'épaule. On déduit de là que :

$$I = 0,0037.$$

4° Les moments d'inertie des *doigts* sont à peu près les suivants :

| Auriculaire     | Annulaire | Médius    | Index     | Pouce       |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| $I = 0,000.004$ | 0,000.012 | 0,000.014 | 0,000.012 | 0,000.006 ; |

5° Dans le membre supérieur, en entier, le centre de gravité tombe aux  $\frac{45}{100}$  environ de la longueur à partir de l'articulation de l'épaule, ou à 0<sup>m</sup>,32. En supposant le poing fermé, on aura sensiblement  $h = 0^m,70$ . Comme  $P = 4^k,24$  et que  $r = 0^m,047$ ,  $r' = 0^m,027$ , on calculera  $I = 0,03$  à peu près.

6° Dans le *membre inférieur*, nous considérerons la *jambe* et puis le tout.

*Jambe* :  $P = 4^{kg},400$  (pied y compris);  $h = 0^m,44$ ;  $r = 0^m,062$ ;  $r' = 0^m,038$ . On déduit de ces chiffres :  $I = 0,013$ .

Pour tout le membre inférieur, on a :  $P = 12$  kilogrammes;  $h = 0^m,88$ ;  $r = 0^m,086$ ;  $r' = 0^m,038$ . D'où :  $I = 0,146$ .

D'après les mesures et les calculs, le centre de gravité du membre inférieur, chez l'adulte, est à  $0^m,38$  environ du centre d'articulation de la hanche. Quant au rayon de giration, il se déduit de  $I = M\rho^2$ , qui donne  $\rho = 0^m,34$ .

Le centre de gravité est aux distances  $p$  et  $d$  des articulations proximales et distales, et l'on a :

Cuisse,  $p/d = 44/56$ . Jambe :  $42/58$ . Bras :  $47/53$ . Avant-bras :  $42/58$ , et si l'on y ajoute la main fermée, on aura :  $p/d = 2/1$ .

De même, en ajoutant le pied à la jambe, on trouve :  $3/2$ .

La connaissance des moments d'inertie conduit au travail d'oscillation; la vitesse angulaire étant  $\omega$ , on a :  $\mathcal{E} = \frac{1}{2} I\omega^2$ .

Les opérations précédentes supposent l'homme libre de tout fardeau; mais il est clair que les centres de gravité changent de position, et les moments d'inertie changent de valeur si les membres oscillants soutiennent une charge. Nous avons voulu, tout simplement, montrer qu'il est possible de faire les mêmes déterminations dans tous les cas possibles. Braune et Fischer en ont donné des preuves nombreuses auxquelles n'ont manqué ni les bases expérimentales ni les fondements théoriques. La méthode ne saurait être rigoureuse que si les mouvements étaient repérés, dans leurs différentes phases, en grandeur, en vitesse, par la *chronophotographie*. Les savants allemands firent usage de la *chronophotographie géométrique* de Marey (§ 6) en rendant lumineux les points et lignes à photographeur par l'emploi de *tubes de Geissler* (1).

(1) Braune et Fischer, *Der Gang des Menschen*, 1<sup>re</sup> partie (*Abhand. d. math.*, t. XXI; 1895). Nous avons donné, dans *Organisation physiologique du travail*, p. 265, le tableau rectifié des proportions des segments de membres, de leur inertie, moments, etc. Voir aussi Otto Fischer, *Handb. Methodik de Tiegnerstedt*, II, 3<sup>e</sup> partie, p. 187; 1908.

279. **Locomotion humaine.** — Dans les mouvements d'ensemble du corps humain, on peut considérer ceux de la *locomotion terrestre* et ceux de la *locomotion aquatique*; ils obéissent les uns et les autres à l'action musculaire.

I. La LOCOMOTION TERRESTRE a une forme habituelle : la *marche*, mais on y comprend également : le *ramper*, qui accroît les points du contact du corps avec le sol ; la *course* et le *saut*, qui diminuent la surface et la durée de ce contact ; enfin le *grimper*, dans lequel on se suspend au moyen des bras.

1° *La marche.* — Elle a été particulièrement étudiée par

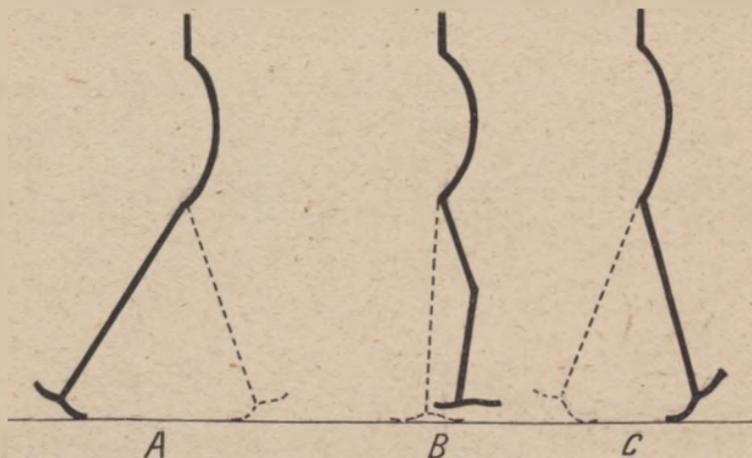


FIG. 257. — Différents temps d'un pas simple ; le sujet va de A en C.

les frères Weber, Marey et Braune et Fischer (1). Nous suivrons de préférence ces deux derniers auteurs, parce qu'ils ont complété Marey, sans négliger d'utiliser ses expériences. La technique a mis à contribution les procédés graphiques (Marey) et chronophotographiques (Marey, Braune et Fischer), et permis de déterminer la longueur du pas, la pression des pieds, l'effort des muscles, la forme du mouvement, en fonction de la vitesse. La marche est essentiellement une

(1) E. et W. Weber, *Mécanique de la locomotion chez l'homme*, trad. Jourdan, 1843 (ouvrage qui a beaucoup perdu) ; Marey, *le Mouvement*, Paris, 1894 ; Braune et Fischer (*Abhandlungen...*, t. XXI, n° 4 ; XXV, n° 1 ; XXVI, n° 3 et 7 ; XXVIII, n° 5 et 7 ; *Der Gang des Menschen*, 1895 à 1904 ; environ 700 pages in-4°) ; Jules Amar (*Revue de Chirurgie*, juillet-août 1919).

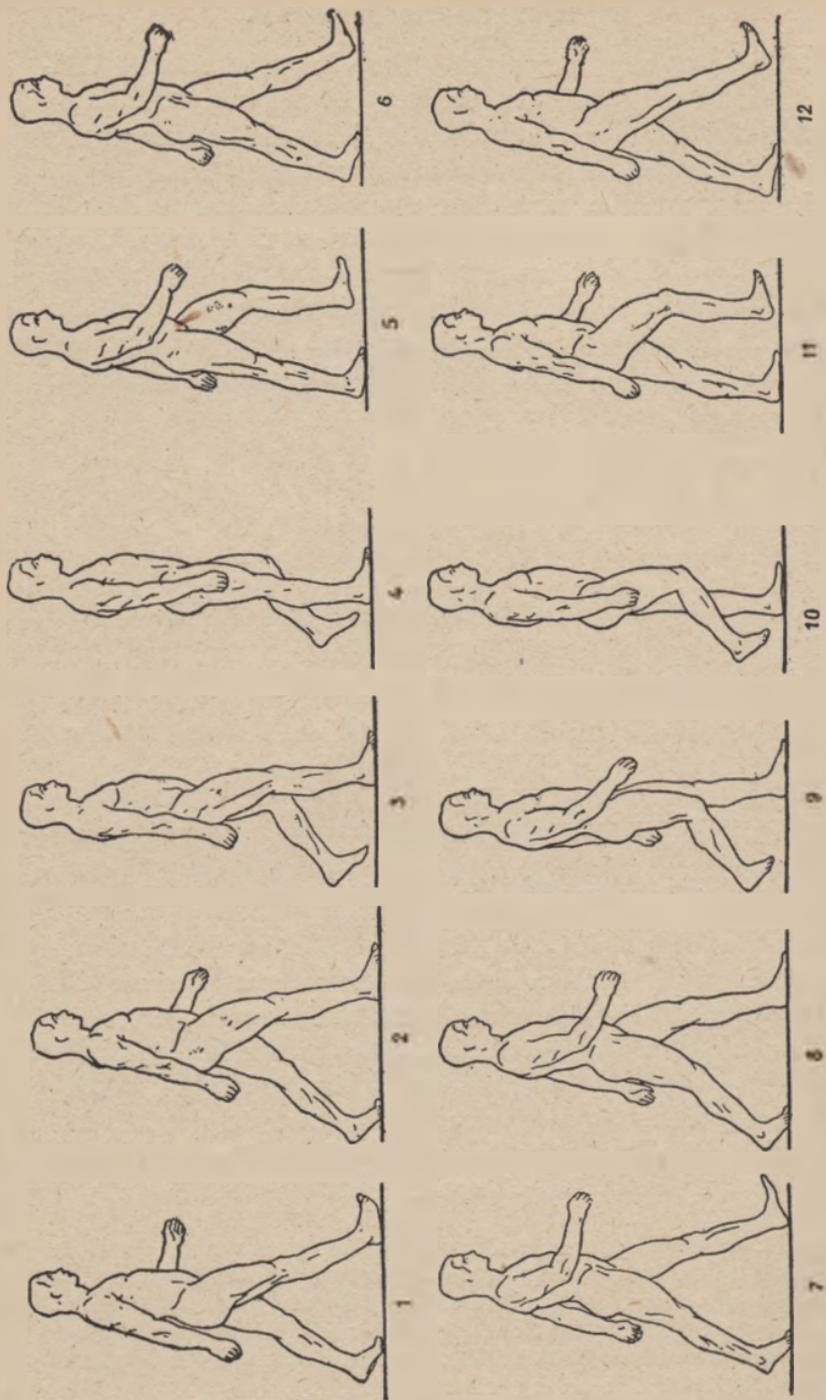


Fig. 258. — Divers temps du double pas dans la marche (d'après Richer et Londé).

rupture de l'équilibre mécanique du corps produisant un déplacement des jambes, lesquelles soutiennent alternativement le poids total de ce corps. Cette translation est assurée par une oscillation régulière du centre de gravité général ; ce centre se porte toujours au-dessus de la jambe qui appuie à terre, la *jambe portante*, tandis que l'autre jambe se détache du sol par la pointe du pied, oscille et vient se placer en avant de la précédente : c'est la *jambe oscillante*. Si l'on considère la distance qui sépare les pieds dans la marche, on a la grandeur du *pas* ; mais les deux jambes ne se remettent dans la même position qu'à chaque *double pas*. Les différentes périodes d'un double pas sont au nombre de *trois* : l'une, d'environ  $\frac{4}{10}$  de seconde, pendant laquelle la jambe arrière quitte le sol par la pointe du pied et vient se poser en avant par le talon (*fig.* 257, A, B, C) ; il s'écoule environ  $\frac{1}{10}$  de seconde où les deux pieds sont à terre. Il y a donc une période d'*oscillation* et une de *double appui*. Comme dans la marche ordinaire (121 pas à la minute, égaux à 0<sup>m</sup>,75), la durée du double pas est de 1 *seconde* à peu près, il s'ensuit que la jambe qui oscillait demeure à terre  $\frac{5}{10}$  de seconde pour servir d'appui au corps et en assurer la *propulsion*, et elle s'applique à terre du talon à la pointe pour s'en détacher de même. La figure 258 montre la succession des mouvements dans le double pas.

280. Fischer<sup>(1)</sup> a fait l'analyse du double pas sur un sujet adulte, pesant 58<sup>kg</sup>,7, ayant une taille de 1<sup>m</sup>,67 et 0<sup>m</sup>,87 pour longueur des membres inférieurs. En moyenne, cet homme faisait 121 pas à la minute, égaux à 0<sup>m</sup>,75 chacun, soit d'une durée de 0<sup>s</sup>,495, ou 5<sup>h</sup>m,445 à l'heure.

Partons de l'instant où le pied droit quitte le sol et commence à planer ; la jambe gauche est en avant et un pas est accompli, le tronc est poussé sur cette jambe qui devient *portante* et commence

(1) O. Fischer (*loc. cit.*, t. XXV, n° 1). — Examinant 103 fantassins du 8<sup>e</sup> régiment (en Saxe), il reconnaît que la grandeur du *pas* est variable et atteint 0<sup>m</sup>,80 au moins (*loc. cit.*, t. XXVIII, n° 5, p. 343 ; 1903).

la période dite d'appui et de propulsion ; la jambe droite qui est levée se raccourcit en fléchissant au genou (angle de  $150^\circ$ ), elle prononce ce raccourcissement de manière à pouvoir osciller, puis le genou se raidit, le cuisse se porte en avant inclinée à  $25^\circ$  sur la verticale, et le pied droit se pose par le talon. Remarquons que l'arrivée à terre se fait lentement, sans accélération ; les muscles ont amorti l'effet pendulaire que Weber avait cru gouverner l'oscillation des jambes. Théoriquement il s'agirait d'un pendule composé de période :

$$t = \pi \sqrt{\frac{I}{Mgl}}$$

I étant le moment d'inertie (§ 28) ; cela conduirait à :

$$t = \pi \sqrt{\frac{0,146}{12 \times 0,38}} = 0,56,$$

valeur trop forte. Il y a donc une action musculaire ; Fischer la trouva supérieure à celle de la pesanteur : elle est due d'abord aux fléchisseurs de la jambe, puis à ceux de la cuisse sur le bassin, et enfin au quadriceps qui se contracte vivement et lance la jambe en avant ; le dos du pied fléchit pour adoucir le choc au contact du sol.

D'autre part, dans cette période d'oscillation, le point d'appui du membre, à la hanche, n'est pas fixe ; il s'avance d'un pas : ce que l'on pourrait représenter par le schéma de la

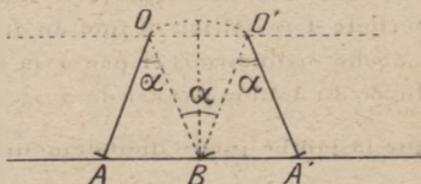


FIG. 259.

figure 259 : la hanche est allée de O en O', et la jambe OA en O'A'. La durée de l'oscillation correspond au parcours BA', et l'angle d'oscillation est égal seulement à  $\alpha$ , et non à  $2\alpha$ . Dans l'exemple choisi par Braune et Fischer, on a :  $t = \frac{415}{1000}$  de seconde ;  $AB = 0^m,778$  ;  $OA = 0^m,870$ . Si le triangle AOB était équilateral, on aurait  $\alpha = 60^\circ$  ; ici :

$$\alpha = \frac{60 \times 778}{870} = 53,60 \text{ environ,}$$

ce qui conduit à une vitesse angulaire moyenne de :

$$\frac{53,60 \times 1.000}{415} = 129,$$

ou en radians :

$$\omega = \frac{\pi \times 129}{180} = \frac{43\pi}{60} \text{ (voir § 2 et 28).}$$

(1) La valeur corrigée serait  $0^,465$ , tout de même élevée.

L'oscillation de la jambe droite terminée et le pied posé par le talon, il y aura un moment pendant lequel le pied gauche n'a pas encore commencé de planer: c'est la période très courte du *double-appui*, les deux pieds étant à terre; elle est caractéristique de la marche, à toutes les allures; dans l'allure normale du piéton que nous avons considérée, la durée du double appui est de  $\frac{81}{1000}$  de seconde, 5 fois plus petite que celle de l'oscillation. Le double appui est le début de la période d'appui pour la jambe droite devenue portante; elle est, à cet instant, inclinée de 25° environ sur la verticale; puis, à mesure que le pied s'applique sur le sol, la jambe, d'abord fléchie, se raidit au genou, le membre inférieur prend tout son développement; la hanche décrit, par conséquent, une courbe de rayon croissant; passé la position perpendiculaire de la jambe, la hanche décrit une courbe inverse; en définitive, sa trajectoire ressemble assez à la trajectoire d'un point mobile à l'intérieur d'un demi-cylindre creux et s'élevant du fond vers le bord. Marey a enregistré ces sinuosités d'après une technique qui fournit les mouvements du *pubis*.

Le raidissement du genou, le soutien de tout le poids du corps sans flexion de la cuisse sont dus aux contractions musculaires, en particulier à celle du quadriceps. Le pied se *déroule* du talon à la pointe, et dans ce *déroulement* le membre inférieur demeure droit par la contraction des muscles de la hanche et du fémur; il supporte la pression que lui transmet la jambe arrière, et c'est en devenant vertical que la pression est la plus grande. Fischer a vu cette pression devenir égale à 70 kilogrammes, puis à 77 kilogrammes au maximum, sur un sujet de 58<sup>kg</sup>,400, soit un accroissement moyen de 25 0/0. Marey, puis Carlet, ont mesuré la pression des pieds en munissant ceux-ci de *chaussures exploratrices* (§ 220); ils n'ont jamais constaté, dans la marche, un accroissement apparent de poids supérieur à 20 kilogrammes. Mais il y a aussi, dans la marche, une réaction du sol, *force tangentielle*, qui se traduit par une valeur négative. Fischer évalue cette composante à — 7 kilogrammes, à l'instant où la jambe arrière se lève; elle atteint aussitôt — 16 kilogrammes et garde cette valeur pendant la durée de l'appui. Marey et Démeny ont employé un *plancher dynamographique* (1) pour enregistrer les composantes verticales et horizontales des pressions des pieds: c'est un plancher fixe s'appuyant sur des spirales de tubes en caoutchouc à section étroite: la quantité d'air qui en est chassée vient actionner un tambour enregistreur. La courbe de la pression verticale (*fig. 260*) oscille de part et d'autre de la ligne du poids du corps; dans la transmission de la masse du corps d'une jambe sur l'autre, l'oscillation normale est négative. Quant à la courbe de la pression tangentielle (II), on voit clairement que celle-ci est négative au poser du talon, et devient positive à la

(1) *Comptes Rendus Acad. Sc.*, 8 octobre 1892.

fin du déroulement du pied. Ce déroulement du pied a été comparé par les frères Weber à celui de la jante d'une roue, assimilation, quelque peu osée, attendu que le rayon, ici le membre inférieur, change de longueur. Au cours de ce déroulement, et avant que le membre devienne vertical, la jambe arrière se lève; on retomberait donc à la renverse si, en quittant le sol, la pointe du pied arrière ne donnait pas une impulsion au tronc, le poussant sur la jambe progressivement portante. La propulsion a donc lieu à la fin du double appui et produit tout son effet durant l'appui.

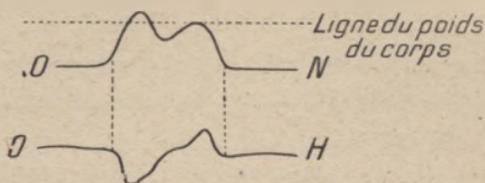


FIG. 260. — Pressions normale N et tangentielle H, zéro de l'instrument.

Dans les expériences de Fischer, la période d'appui fut de  $\frac{494}{1000}$  de seconde, et en y ajoutant celle de double appui :

$$\frac{494}{1.000} + \frac{81}{1.000} = \frac{575}{1.000}$$

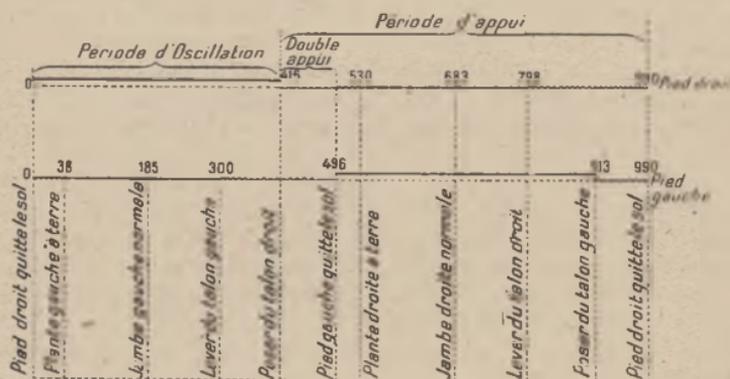


FIG. 261. — Analyse des temps d'un double pas en millièmes de seconde (d'après du Bois-Reymond).

Voici une représentation schématique (fig. 261) des périodes d'activité des deux jambes, d'après R. du Bois-Reymond; elles sont exprimées en millièmes de seconde.

281. Analyse dynamographique de la marche. — Malheureusement, la technique de Marey, aussi bien que celle de Braune et Fischer, ne permettaient pas d'enregistrer l'action musculaire des

jambes dans toutes leurs périodes. Car Marey n'a, somme toute, utilisé qu'une sorte de bascule donnant l'accroissement dynamique du poids pendant que le corps se meut. Et la chaussure exploratrice n'offre guère plus de précision (1).

De là, pour nous, l'importance de l'analyse des mouvements locomoteurs au moyen du *Trottoir dynamographique* (§ 221).

Examinons, d'après nos tracés, les phases du pas dans la *marche*

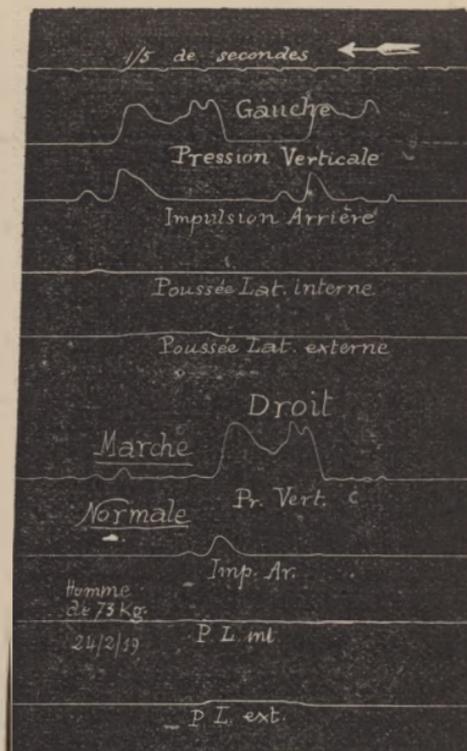


FIG. 262.

*normale*. Il y en a quatre que l'on a figurées par des fleches sur le schéma du Trottoir représenté plus haut (page 409...).

Le sujet avance en extension un des membres inférieurs, et at-

(1) On peut même faire usage, comme Tilden, d'une véritable bascule où un curseur, se déplaçant sur le fléau, accuse les augmentations de poids (*Trans. Amer. Soc. Civil Engineers*, t. LXXVI; *Genie Civil* du 30 mai 1914, p. 108).

taque le sol par le talon, en déroulant peu à peu la plante du pied. Bientôt, la jambe restée en arrière lance, dans une impulsion rapide, toute la masse du corps qui vient peser sur la jambe portante devenue verticale. On enregistre donc cette *pression verticale*, droite ou gauche suivant le membre qui appuie (P. V. D. ou P. V. G.), et l'*impulsion antéro-postérieure* du pied qui se lève

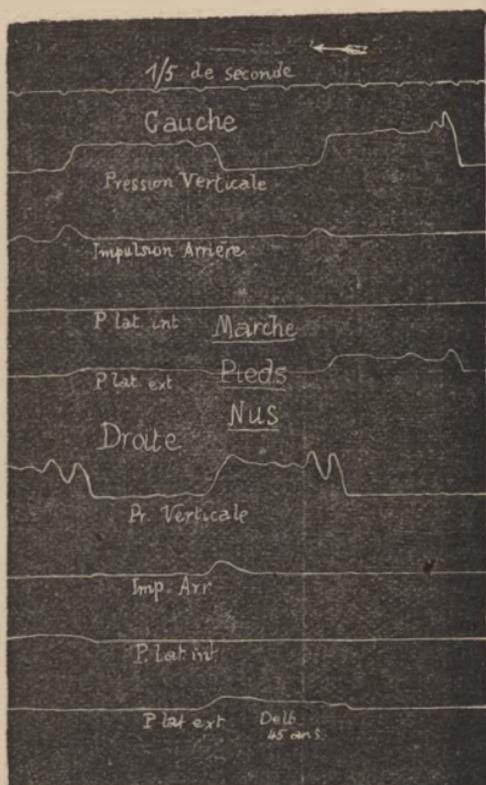


FIG. 263.

en arrière (Imp. Arr.). Cette impulsion, d'environ 6 kilogrammes pour un homme moyen, refoule le sol, produit un frottement, et obéit à l'effort oblique du métatarse et des orteils, comme il résulte des *empreintes* recueillies sur une platine de cire (*stent's composition*) (1).

Notons aussi que le pied oscille tout entier autour de ses articulations tarsiennes, lesquelles obéissent aux mouvements du centre de gravité général. S'il tourne en dedans, il donnera une *poussée laté-*

(1) Voir *Revue de Chirurgie*, mai-juin 1918, et juillet-août 1919.

rale interne (P. L. I.); il fournirait une *poussée latérale externe* (P. L. E.) s'il tournait en dehors.

Les phases ainsi décomposées traduisent des contractions musculaires combinées, des efforts. Et tous les tracés montrent qu'il existe toujours, dans la marche normale, une petite poussée latérale *externe* (fig. 262). Cela prouve que l'impulsion arrière ne peut



FIG. 264.

assurer la progression normale du corps qu'à la condition que le pied portant s'arcoute au sol. Tout se passe donc comme si les deux moitiés du corps versent également vers le plan médian et s'étayent mutuellement. On aura beau accélérer son allure, imprimer au centre de gravité des oscillations sensibles, il n'y aura pas de risque de chute.

Cette incurvation du pied en dedans, plus marquée avec les  *pieds nus*  que  *chaussés*  (fig. 263 et 264), rappelle le  *devers de la voie*  (page 49) observé par les ingénieurs. On peut donc distinguer dans le pas marché: un déroulement calcanéen, un balancement cal-

canéo-métartasien pour faire avancer le corps, et enfin un déroulement métatarso-phalangien.

A l'allure rapide de 120 pas à la minute, ou 0",500 pour effectuer un *pas simple*, les phases se répartissent comme suit :

|                                     |        |               |
|-------------------------------------|--------|---------------|
| Déroulement calcanéen.....          | 0",457 | soit 31,5 0/0 |
| Balancement calcanéométrarsien...   | 0,213  | — 42,5 0/0    |
| Déroulement métatarso-phalangien... | 0,430  | — 26,0 0/0    |
| Total.....                          | 0",500 | — 100 0/0     |

Les valeurs correspondantes à celles-ci, trouvées par Braune et Fischer, seraient :

$$0",485 - 0",230 \text{ et } 0",085.$$

Mais elles concernent des relevés cinématiques, tandis que les nôtres sont essentiellement dynamiques. Les unes complètent les autres.

On voit surtout que l'action musculaire agit pendant 26 centièmes du déroulement dans l'impulsion arrière; celle-ci occupe le *dernier quart* du pas. Alors la poussée latérale externe se renforce, ce qui vérifie qu'il y a un arc-boutement réel du pied, selon nous, par le *sural*.

A l'allure indiquée de 120 pas, la pression totale représente un excès de 15 à 16 0/0 sur le poids du corps; elle se répartit à raison de 1<sup>re</sup>,700 par centimètre carré de talon, contre 1 kilogramme pour l'avant-pied.

Les angles de flexion et d'extension des différentes articulations se déduisent de la figure cinématographique page 502, et correspondent aux durées de l'action des muscles.

Au genou, c'est 120°, au pied 75° tout au plus. Au passage du membre d'arrière en avant, on observe un peu plus: 140 et 80°.

Nous remarquerons que, chez le paysan, il y a une tendance à supprimer l'*impulsion arrière*, laquelle est généralement absente dans le cas des amputés munis d'un appareil artificiel, et des blessés graves des membres inférieurs.

## 282. Revenons à l'étude cinématique.

D'après ce qui a été expliqué ci-dessus, l'angle correspondant au déroulement du membre est de 53° en moyenne et augmente avec la longueur du pas (voir *fig. 259*); la translation de la hanche et l'impulsion donnée au tronc doivent augmenter dans la même proportion; et comme, par l'écartement des jambes, le tronc, le centre de gravité général s'abaissent, les grands pas entraînent une oscillation verticale plus prononcée que les petits pas (*fig. 265*): ce sera *ac* au lieu de *bc*; aussi est-il à désirer qu'en allongeant le pas on *fléchisse*, en même temps, la jambe portante, diminuant ainsi le rayon *o'B'* et se rapprochant d'un mouvement rectiligne de la hanche. C'est alors la *marche en flexion*, préconisée par le com-

mandant de Raoul <sup>(1)</sup> et qui est celle du paysan, de l'homme qui veut se ménager Théoriquement elle est économique, et de plus, Comte et Regnault <sup>(2)</sup> ont constaté, sur des chronophotographies, que les oscillations verticales diminuent dans une grande mesure, faute, sans doute, de l'impulsion arrière. Mais elle entraîne, du fait de la flexion, un supplément de contraction musculaire ; elle

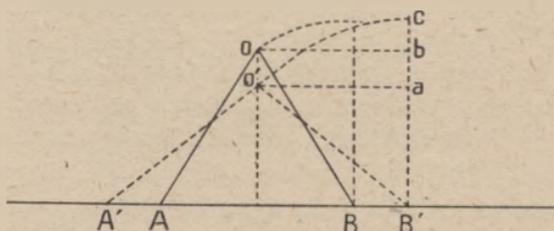


FIG. 265. -- L'oscillation verticale passe de  $bc$  à  $ac$ , quand le pas est  $A'B'$  au lieu de  $AB$ .

exige de bonnes routes et des allures rapides : il faut donc en surveiller soigneusement la pratique dans la marche avec fardeaux et dans l'infanterie <sup>(3)</sup>, tout en la préconisant.

### 283. Mouvements du corps et oscillations dans la marche.

— Les mouvements qui caractérisent la succession des pas se compliquent d'oscillations dans les segments du corps autres que les membres inférieurs. Les jambes elles-mêmes n'en sont pas exemptes : on voit le pied, le genou, la hanche osciller de part et d'autre du plan sagittal du membre ; le pied exerce sur le sol une pression latérale, en outre de ses pressions normale et tangentielle ; enfin les deux membres inférieurs ne se comportent pas d'une manière tout à fait symétrique (voir graphiques et figure 261) : il y aurait une différence de structure réelle entre le côté droit et le côté gauche du corps ; en particulier, le fait que nous sommes en

<sup>(1)</sup> C' de Raoul (*Revue de l'Infanterie*, 15 août 1896) ; Raoul et Regnault, *Comment on marche* ; 1897.

<sup>(2)</sup> Comte et Regnault (*Arch. de Physiol.*, 1896 ; p. 180) ; A. Schmidt *Unser Körper*, p. 426 ; 1899.

<sup>(3)</sup> Voir les critiques de Paul Richer dans le *Traité de Physique biologique* de Marey, d'Arsonval, etc., t. I, p. 216, 1901, et la réponse de Regnault dans *Journ. de Physiol.*, 1913, p. 49.

grande majorité *droitiers* serait dû à un instinct de protection à l'égard du cœur (1).

Le déplacement des jambes fait osciller le *tronc* dont il rompt l'équilibre. Le milieu de la *ligne des hanches* (droite horizontale qui joint les articulations coxo-fémorales) s'élève, puis s'abaisse : son oscillation a une longueur égale à celle du pas et une amplitude moyenne de 4 *centimètres* ; il s'écarte vers la jambe qui pose normalement à terre et revient, au lever du pied, vers le plan médian du corps ; et il subit, dans le plan antéro-postérieur, une certaine accélération. Tous ces mouvements oscillatoires, dont la forme résultante a été déjà décrite (§ 280) ont la même période. Ils entraînent des mouvements semblables de la *ligne des épaules* ; tandis qu'au repos le milieu de cette ligne est sur la verticale du milieu de la ligne des hanches, l'inclinaison de celle-ci dans la marche produit un écart de 1<sup>cm</sup>,50 environ ; pour le reste ce sont les mêmes oscillations que précédemment (2).

Les *bras* ont un balancement en grande partie passif dans la marche ; si la jambe droite avance, c'est le bras gauche qui la suit avec une légère flexion au coude qui raccourcit tout ce membre supérieur ; dans une allure rapide, le raccourcissement augmente pour permettre de nombreuses oscillations à courte période (§ 2). Ces mouvements des bras corrigent les *torsions* du tronc : il suffit de marcher vite les bras croisés pour voir les torsions du corps augmenter aussitôt d'amplitude.

Marey et Demeny (3) reconnurent enfin que la *tête* participe à toutes ces oscillations et décrit une courbe *gauche* à convexité supérieure ; elle s'écarte du plan médian de 2<sup>cm</sup>,50 à l'instant où le pied se pose ; l'écart est presque nul pendant le double appui ; l'amplitude des oscillations verticales peut atteindre 6 centimètres, mais elle ne représente pas — vu que le tronc s'incline — le déplacement vertical du centre de gravité du corps.

(1) Aristote déjà avait fait cette distinction ; voir également Guldberg, *Études sur la dissymétrie chez l'homme...* Christiania, 1897 ; — Chauffard (*Acad. de Méd.*, 12 nov. 1912).

(2) Lamy (*Nouvelle Iconog. de la Salpêtrière*, t. XVIII, n° 1, p. 49).

(3) Marey et Demeny (*Comptes Rendus Sciences*, juin 1885, octobre 1887).

Ce centre de gravité général subit donc des oscillations dans divers plans et ses mouvements sont plus ou moins accélérés. On comprend toute la difficulté que rencontrent les enfants à garder l'équilibre du corps. On peut résumer l'étude précédente en disant :

Dans la marche considérée (5.450 mètres à l'heure et 121 pas par minute), le centre de gravité a une oscillation verticale d'amplitude égale à 4 centimètres ; une oscillation latérale d'amplitude égale à 1<sup>cm</sup>,30 ; et enfin, d'avant en arrière <sup>(1)</sup>, il se déplace de 2<sup>cm</sup>,50.

284. Pour étudier les déplacements de certaines lignes du corps, Marey utilisa la photographie instantanée de sujets revêtus de noir et sur lesquels des baguettes brillantes dessinaient l'épine dorsale, la ligne des épaules, celle des hanches, etc. On obtient donc, sur la même plaque, ou sur un film, une série de droites figurant les positions du segment mobile en fonction du temps : c'est la *chronophotographie géométrique* (voir ci-dessus, § 6).

Braune et Fischer procédèrent également par épreuves photographiques pour déterminer la forme du mouvement ; ils avaient, d'autre part, déduit la position du centre de gravité, la grandeur et le poids de chaque segment du corps de mesures effectuées sur cadavres. Connaissant la répartition des masses et la loi du mouvement, ils calculent les forces agissantes.

On doit signaler que, sur toutes les photographies, le membre inférieur n'est jamais en *extension complète* à l'appui ; l'oscillation verticale se trouve, de ce fait, un peu atténuée. Et cela montre aussi que la moelle épinière intervient, pour empêcher, par cette légère retraction, que la marche ne soit une succession de *chutes*. De fait, il en est ainsi chez le tout petit enfant qui apprend à marcher : il laisse choir ses jambes. Puis l'éducation rectifie ses mouvements, un *automatisme* se crée, si bien que l'on peut marcher en dormant. Toutefois, les pas sont, dans ce cas, lourds et sans grâce.

(1) Il s'agit de l'oscillation moyenne, et non point de la translation du corps.

## CHAPITRE II

### LE TRAVAIL PROFESSIONNEL ET LA LOCOMOTION

(Suite)

285. Travail musculaire dans la marche. — Les éléments de calcul, pour obtenir la valeur du travail des muscles à chaque pas, peuvent être tirés des déterminations de Marey et de Braune et Fischer.

On a, d'abord, une élévation verticale du corps de 0<sup>m</sup>,04, suivie d'une descente freinée égale (énergétiquement, nous savons que celle-ci équivaut aux  $\frac{52}{100}$  de celle-là). Il s'ensuit que, sur un adulte de 65 kilogrammes, le travail musculaire correspondant est :

$$\mathfrak{C}_1 = 65 \times 0,04 \times \frac{152}{100} = 3^{\text{kgm}},952.$$

L'oscillation du nombre inférieur est un travail :

$$\mathfrak{C}_2 = \frac{1}{2} I\omega^2;$$

comme  $I = 0,146$  (§ 278) et :

$$\omega = \frac{43\pi}{60} \text{ (voir § 280).}$$

On aura :

$$\frac{1}{2} I\omega^2 = \frac{1}{2} \times 0,146 \times \frac{43^2\pi^2}{3.600} = 0^{\text{kgm}},370.$$

Pour tenir compte du réfrènement, on écrira :

$$\mathfrak{C}_2 = \frac{0,370}{2} \times \frac{152}{100} = 0^{\text{kgm}},281.$$

En troisième lieu, le centre de gravité général subit une variation de puissance vive dans sa translation ; schématiquement la vitesse est minimum au sommet de la trajectoire  $oco'$  (fig. 266) et elle varie de  $0^m,60$  environ d'après les observations.

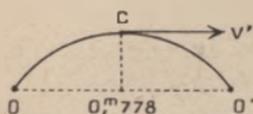


FIG. 266.

Donc :

$$\frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \times \frac{65}{9,81} \times 0,60^2 = 1^{\text{kgm}},192.$$

Pour comprendre dans cette évaluation le travail de réfrénement effectué par les muscles, nous écrirons :

$$\mathcal{E}_3 = 1,192 \times \frac{152}{100} = 1^{\text{kgm}},812.$$

Nous faisons abstraction des petits mouvements musculaires dus à diverses autres oscillations du tronc, et nous obtenons finalement :

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = 3,952 + 0,281 + 1,812 = 6^{\text{kgm}},045,$$

en moyenne 6 kilogrammètres par pas.

Le travail musculaire que nous venons de calculer est relatif, cela est évident, à une allure et à un sujet déterminés. Aussi, les résultats obtenus par les auteurs, ramenés à un poids de l'homme et à une allure toujours les mêmes, sont-ils passablement concordants.

A raison de 6 kilogrammètres pour des pas de  $0^m,778$ , on arrive à :

$$\frac{6 \times 1.000}{0,778} = 7.712 \text{ kilogrammètres}$$

par kilomètre parcouru, et cela donne une idée de la grandeur du travail musculaire dans la marche. Toutefois, l'oscillation verticale du corps, élément prépondérant dans la dépense de travail musculaire, se modifie suivant la nature du terrain et le degré de flexion que l'on imprime aux jambes en marchant. Regnault remarque que dans la marche en flexion, les pieds pressent doucement sur le sol et moins

que dans la marche en extension. En cette matière, il ne faut pas prétendre à des évaluations rigoureuses, même si l'on se guide sur de bonnes observations; il est également nécessaire de songer que la contraction des muscles peut prendre des *valeurs statiques* très élevées qui échapperont aux mesures, et dont seule la *dépense d'oxygène* pourra fournir l'équivalent exact. La marche étant une fonction à laquelle l'homme est particulièrement entraîné, il semble que le travail à chaque pas ne s'élève guère au-dessus de 4 kilogrammètres.

**286. Le rythme dans la marche.** — Marey étudia l'effet du rythme ou nombre de pas dans l'unité de temps. Il se servit d'une piste horizontale de 500 mètres le long de laquelle des poteaux, placés de 50 en 50 mètres, rompent un circuit électrique au passage du marcheur.

Il enregistra ainsi les variations de *longueur du pas* en fonction du rythme ou de la *cadence*. Cette longueur augmente

jusqu'à 150 pas à la minute, puis diminue (fig. 267); elle est au *maximum* de 0<sup>m</sup>,85, le sujet ayant une taille de 1<sup>m</sup>,67 comme dans les expériences de Fischer.

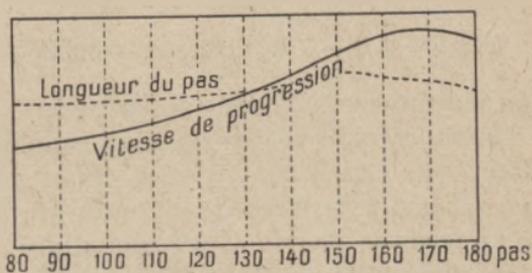


Fig. 267. — Effets de la cadence du marcheur.

Sur 103 soldats, étudiés avec soin, Fischer constate que la marche présente des *caractères individuels*, c'est-à-dire que les sujets étant aussi semblables que possibles, leur *pas* n'a ni même longueur ni même durée; et il conclut qu'il n'existe pas de *type* absolument général dans la marche. C'est ce que confirment les graphiques pris avec le Trottoir.

Démény<sup>(1)</sup> montre, d'autre part, que jusqu'au rythme de 200 pas on observe toujours une période de *double appui*: la rapidité du mouvement n'empêche pas le contact, très bref,

(1) Démény (*Comptes Rendus Sciences*, 25 juin 1885).

des deux pieds avec le sol simultanément ; mais cette brièveté s'accélère plus vite que la marche, et, entre 80 et 200 pas, elle varie de 175 à 50 millièmes de seconde.

Les oscillations latérales du tronc diminuent aux cadences rapides, car les pieds tendent à se rapprocher de la *ligne de progression* ; il faut aussi remarquer qu'en réduisant la période du mouvement des jambes, on rend difficile l'oscillation synchrone du buste, lequel a une période assez grande. De même les bras fléchissent et réduisent leur amplitude d'oscillation, si bien que la marche rapide est conditionnée pour être *plus économique* que les marches lentes sur un parcours donné. Mais le *pas* exigera une dépense de travail musculaire croissant, en gé-

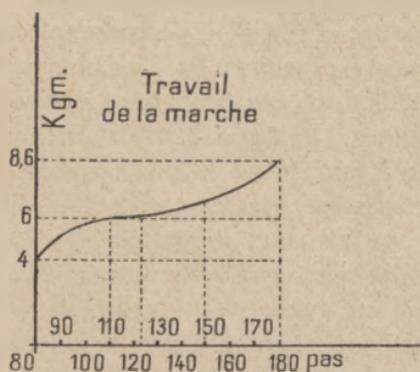


FIG. 268.

néral, avec l'allure. Marey reconnu qu'il en est ainsi jusqu'au rythme de 110 pas, et à partir de 130 pas à la minute. Entre 110 et 130, la valeur du pas présente une certaine constance ; c'est la *bonne allure*. Au delà de 140 pas, la courbe du travail (*fig. 268*) s'élève très rapidement, et nous

verrons qu'il est des allures tellement fatigantes que la *course* leur est préférable ; du reste, plutôt que de les adopter, l'homme se résout, généralement, à courir.

**287. Conclusion.** — Adoptant les chiffres que fournit la courbe ci-contre, nous pouvons calculer la dépense de travail par *mètre-kilogramme* (§ 243). L'adulte pesant 65 kilogrammes et parcourant 1 kilomètre dépense 7.712 kilogrammètres, soit :

$$\frac{7.712}{65 \times 1.000} = 0,119 \text{ par mètre-kilogramme,}$$

à la vitesse de 3.450 mètres à l'heure.

On aura, de même :

|            |                                   |       |    |       |                       |
|------------|-----------------------------------|-------|----|-------|-----------------------|
| Vitesse de | 80                                | 120   | et | 180   | pas par minute        |
|            | 0 <sup>k</sup> <sub>5m</sub> ,088 | 0,119 |    | 0,176 | par mètre-kilogramme. |

Ces différentes valeurs n'ont pas d'autre intérêt que d'offrir les éléments d'une comparaison ; nous verrons qu'au point de vue des applications, seule la dépense d'énergie (par l'oxygène) est utile à connaître.

288. **Marche avec fardeau.** — La forme générale du pas reste la même quand on porte un fardeau ; mais les durées de chaque mouvement se modifient. Tout d'abord il y a *réduction* de la longueur du pas et, par contre, accroissement de la période d'appui, notamment du double appui ; le pied pose complètement à plat, et la jambe portante a les muscles plus contractés. Quant aux oscillations verticales, elles diminuent à raison même de la diminution de longueur du pas, d'autant plus que le sujet chargé est enclin à marcher « en flexion ». Mais il faut distinguer, pour les autres oscillations, entre les différentes manières de porter un fardeau : sur la tête, il élève le centre de gravité et oblige les muscles à lutter contre l'instabilité du corps ; sur l'épaule ou sur la nuque cet inconvénient est bien moindre, mais, tandis que, dans ce dernier cas, le corps oscille dans un plan antéro-postérieur et les muscles doivent vaincre l'*inertie* du fardeau ; dans l'autre cas, où le poids est sur l'épaule, cette inertie se fait sentir très peu, le corps répartissant sa masse pour compenser l'effet de la charge (§ 272), et le centre de gravité demeurant sensiblement dans le même plan qu'avant. La répartition n'est, cependant, jamais telle qu'elle puisse compenser une charge supérieure à la moitié ou aux  $\frac{2}{3}$  du poids du tronc, soit à 16 ou 22 kilogrammes. Il semble donc, *a priori*, que le mode de transport le plus économique consiste à porter des fardeaux de 20 kilogrammes tout au plus, et sur l'épaule.

Pour les mêmes raisons, le *havresac* du fantassin ne doit pas être appuyé au dos, mais sur le *flanc* ; en le disposant sur les reins, on laissera, toutefois, plus libres les mouvements des membres.

Les hommes de peine (coltineurs, charbonniers, etc.) ne portent sur la tête que des fardeaux très lourds et de petit volume, car il n'en résulte pas d'élévation excessive du centre de gravité, et le corps résiste mieux suivant son axe dorsal ; les puissants muscles du cou assurent l'équilibre de la tête.

**289. Marche avec déplacement d'une résistance.** — La période d'appui et le double appui augmentent aussi quand le sujet marche en poussant ou en tirant un fardeau. Le corps s'incline de manière à faire intervenir sa masse, et on voit le centre de gravité s'avancer dans le sens du déplacement. En outre, les membres inférieurs prennent une position légèrement fléchie qui atténue les oscillations verticales du corps (voir § 347).

Il est évident que l'effort nécessaire à la propulsion augmente proportionnellement à la résistance ; ce que révèle la contraction plus intense, la forme plus saillante des muscles *quadriceps* et *sural*.

L'évaluation du travail est ici complètement incertaine ; il dépend, en effet, du degré d'inclinaison du corps, du mode de soutien par les bras, que des groupes de muscles divers prennent part à la manœuvre. Et l'habileté professionnelle modifie très nettement les résultats, par cela même qu'elle réduit l'effort statique et les mouvements inutiles.

Toujours est-il que les différentes variables du travail se manifestent dans la dépense énergétique, évaluée d'après l'oxygène consommé. C'est le seul élément à considérer si l'on veut évaluer la fatigue résultant d'une marche anormale par suite de blessures ou de mutilations (J. Amar, *loc. cit.*).

**290. Marche ascendante.** — Au lieu de la marche *en palier*, horizontale, que nous avons considérée jusqu'ici, occupons-nous de la *marche ascendante*, sur escalier ou sur plan incliné.

Sur les marches d'un escalier, un des membres inférieurs fléchit pour s'élever, et le pied vient appuyer par toute la plante ; la contraction du muscle *quadriceps* permet cette élévation et cette flexion préalable sur le tronc (*fig. 269*) ; la jambe portante est en extension ; puis le corps s'incline en avant, et le centre de gravité surplombe la jambe fléchie ;

celle-ci s'étend peu à peu en soutenant tout le poids du corps, et la jambe postérieure arrive, par oscillation et légère flexion, au niveau de la même marche. En général, elle ne s'y tient pas; accentuant son degré de flexion, elle se portera sur la marche suivante, tandis que l'autre jambe deviendra portante à son tour.

L'oscillation est d'autant moins ample que la distance horizontale d'une marche à la suivante est plus petite; mais la période de double appui est prolongée.

Le travail effectué est égal au poids du corps par la hauteur des marches que l'on monte, car l'oscillation verticale du centre de gravité qui a lieu sur un terrain plat disparaît, pour peu qu'on examine la trajectoire d'une ascension. Il en résulte que si  $h$  est la hauteur totale de l'escalier, le travail sera :

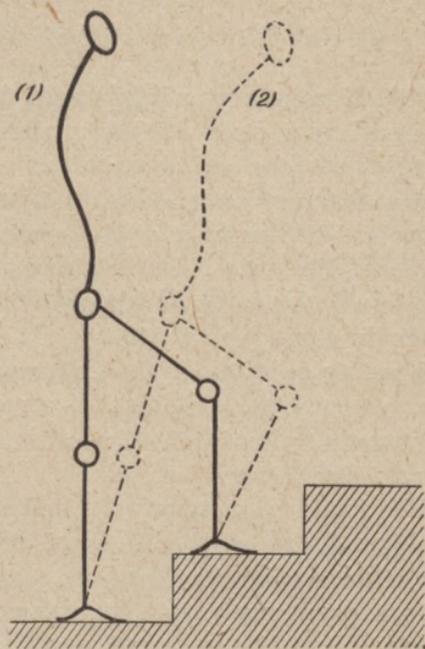


FIG. 269. — Ascension d'escalier.

$$\mathcal{E} = P \times h.$$

Et si le sujet porte un fardeau  $Q$ , ce sera :

$$\mathcal{E}' = (P + Q) h.$$

Dans la marche sur escalier, il y a exagération des balancements latéraux du corps, surtout quand on porte des fardeaux; et dans une ascension rapide, il y a certainement une légère oscillation verticale; l'ombre portée sur un mur d'escalier suffirait à le montrer.

291. En s'élevant sur un *plan incliné* (voir § 54), on se trouve dans les conditions mixtes de la marche sur escalier

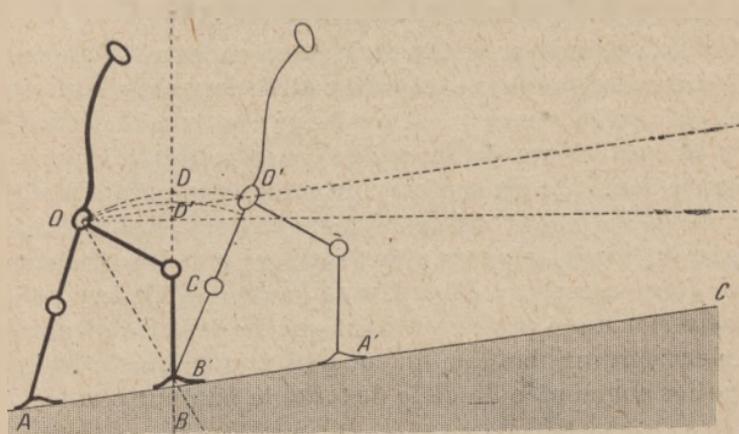


FIG. 270. — Marche sur un plan incliné.

et sur terrain plat. La jambe antérieure B (fig. 270) est nécessairement fléchie, de sorte que  $OCB' = OB$ ; en outre, le

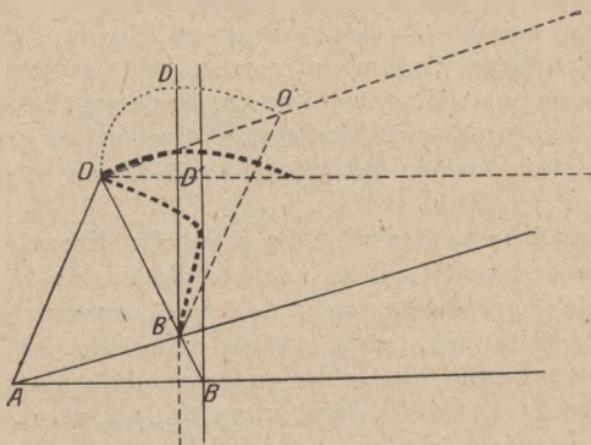


FIG. 271.

corps se porte en avant pour résister à la composante tangentielle de la pesanteur.

En devenant verticale, la jambe antérieure élève le poids

du corps de la quantité  $DD'$  égale à l'amplitude de l'oscillation du corps augmentée de la pente correspondant au pas (*fig. 271*), pente qu'il ne redescend à aucun instant.

Ainsi, la marche sur plan incliné en montant équivaut à la somme de la marche en palier et de la marche sur escalier. Le double appui y est prolongé; les muscles quadriceps et postérieurs de la cuisse sont contractés dans le membre portant; les muscles du mollet travaillent à effectuer le déplacement du membre postérieur. Enfin, l'inclinaison du corps exige un effort statique plus important que celui d'une ascension d'escalier de hauteur égale à la pente. Il ne serait donc pas surprenant que la dépense d'énergie, en marchant sur plan incliné, fût plus grande que la dépense en palier augmentée de celle de toute la hauteur montée.

**292. Marche descendante.** — En descendant un escalier *lentement*, on tient le corps droit; la jambe portante fléchit, tandis que l'autre se rend en extension à la marche au-dessous; elle y devient portante à son tour, et fléchit pour soutenir la chute de la jambe oscillante, et ainsi de suite (*fig. 272*). On descend toujours de manière que les membres inférieurs soient alternativement en flexion. Les bras oscillent très peu; celui qui correspond à la jambe descendante se porte légèrement en avant. Ce sont les muscles triceps et soléaire qui luttent contre la pesanteur et qui travaillent à transformer une vitesse accélérée en une vitesse uniforme.

Vient-on à descendre vite? Le corps s'inclinera pour que le centre de gravité soit en avant et détermine une chute rapide: le degré de flexion et le travail musculaire de la jambe portante seront plus restreints; l'oscillation des bras sera presque nulle (c'est ainsi qu'un pendule n'oscille pas en tombant, sa période étant alors égale à zéro). Mais la jambe portante atteindra en flexion la marche au-dessous et amortira le choc; le pied portera sur la pointe et non comme tout à l'heure, sur toute sa plante. Il suit de là un travail un peu plus grand pour le membre portant, ce qui n'empêche pas qu'en définitive le travail musculaire décroît avec la vitesse dans cette *descente freinée*.

D'une marche à la suivante, il faut conserver l'équilibre du corps sur un seul pied ; c'est la difficulté que rencontrent les enfants, et c'est celle que doivent surmonter les personnes descendant avec un fardeau ; les uns et les autres font de petits pas et redoutent les grandes oscillations du centre de gravité.

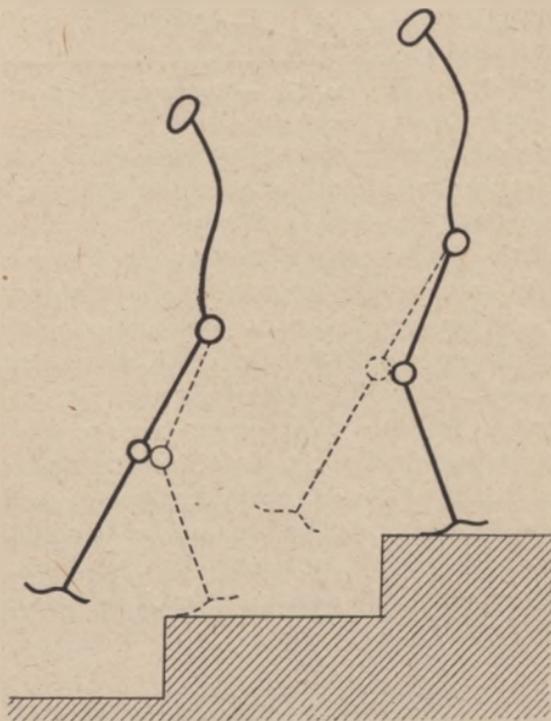


FIG. 272. — Descente d'escalier.

Le transport de fardeaux sur escaliers exige que les marches soient basses (de 7 à 10 centimètres de hauteur au lieu de 15 à 20 comme c'est le cas habituel), et d'autant plus que les hommes sont de petite taille. Autrement le degré de flexion au genou serait tel qu'il entraînerait une fatigue rapide.

293. La descente sur *plan incliné* n'est pas exactement l'analogue de celle que nous venons de décrire.

Pour conserver la même longueur de pas, le corps s'inclinera, sans quoi le pas sera plus court :  $AB'$  au lieu de  $AB''=AB$  (fig. 273).

La jambe  $OB$  est en extension, mais la jambe arrière  $OA$  fléchit, et d'autant plus qu'il s'agira d'une déclivité plus accentuée : la flexion

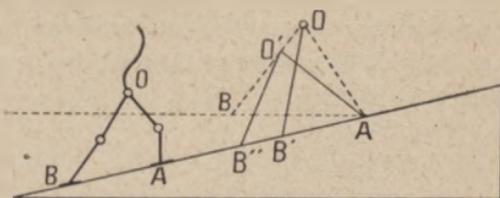


FIG. 273. — Descente sur plan incliné.

lui permettra de s'ancrer, pour ainsi dire, et de résister à la pesanteur ; les pieds appuient par toute leur surface ; le double appui est plus long que dans la marche en palier. La propulsion est assurée par la composante tangentielle de la pesanteur, laquelle a une valeur proportionnelle à la pente (§ 54). Aussi le travail musculaire est-il sensiblement celui d'une descente freinée augmenté de celui de la marche en palier ; toutefois les oscillations du centre de gravité semblent beaucoup plus atténuées que dans la marche en raison de la flexion des jambes, flexion qui paraît croître avec la pente du plan incliné. Rien de plus complexe que ce mode de locomotion, encore qu'il n'exige qu'une faible activité de la part des muscles. La majeure partie du travail est fournie par le muscle quadriceps dont nous avons déjà vu le rôle prédominant.

Réaumur et de Mairan avaient déjà remarqué qu'on fait de plus grands pas en montant un plan incliné qu'en le descendant, et ils en donnent l'explication : « Dans le premier cas, la jambe portante demeure tendue et fatigue peu, tandis que, dans le second, elle se plie et fatigue davantage, rendant nécessaire de changer vite de jambe portante ; on fait ainsi de plus petits pas, mais plus nombreux ; on marche plus vite en descendant <sup>(1)</sup> »...

294. 2° La course. — La caractéristique de la course est bien moins dans son rythme rapide que dans la disparition du double appui ; les jambes alternent à l'appui, mais dans cette

(1) Histoire Acad. Roy. des Sciences, 1721, p. 24.

alternance il existe un moment où le corps est entièrement *suspendu* en l'air. Toutes les phases de la marche, sauf que la *suspension* remplace le double appui, se retrouvent dans la course, mais les membres inférieurs demeurent toujours plus ou moins *en flexion*, suivant que le rythme est plus ou moins accentué.

Généralement, la jambe qui se pose à terre s'y applique par toute la plante du pied (1), et, avant de se développer par l'extension complète du membre inférieur, les muscles fléchisseurs — gastrocnémiens et soléaires — se contractent et repoussent le sol d'un coup sec; il s'ensuit une succession de *bonds* d'une jambe sur l'autre. La phase de suspension augmente à mesure que la vitesse de la course croît, et, con-

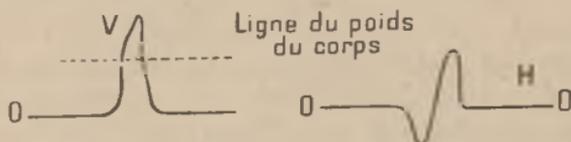


FIG. 274. — Pressions des pieds dans la course.

séquentement, l'appui se réduit; il n'est plus représenté, parfois, que par le temps nécessaire au choc du pied sur le terrain. De ce choc il résulte une *pression* croissant avec l'allure; la composante verticale V (*fig. 274*) est toujours positive; la composante tangentielle H serait d'abord négative, puis positive; mais nos tracés au trottoir ne donnent pas H négatif.

La plus grande vitesse réalisée dans les concours de course atteint 10 mètres à la seconde, correspondant à 3 ou 4 pas de 3 mètres à 2<sup>m</sup>,50. La durée du pas varie de 20 à 35 centièmes de seconde, suivant que sa longueur est de 1<sup>m</sup>,50 à 3<sup>m</sup>,40, et l'accroissement de cette longueur est corrélatif d'une *période de suspension* plus grande; en moyenne, cette période est voisine de  $\frac{25}{100}$  de seconde pour l'ensemble de la suspension d'une jambe, puis des deux à la fois (*fig. 275* :

(1) Dans une course très rapide, le pied prend contact avec le sol par les orteils seulement.

ligne courbe); cette double suspension seule dure de 8 à 9 centièmes de seconde. Tandis que, dans la marche, la durée de l'appui s'augmentait de celle du double appui; dans la course, la durée de la double suspension diminue celle de l'appui.

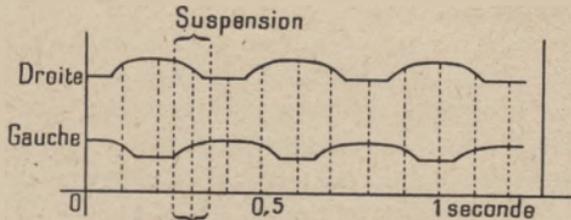


FIG. 275. — Phase de la course (d'après du Bois-Reymond).

Différentes oscillations se produisent dans la course : la tête décrit une courbe à concavité inférieure, le point le plus bas correspondant à l'appui du pied. Sur les épreuves chronophotographiques, on s'assure que l'oscillation verticale est moindre que dans la marche. Le tronc oscille latéralement et subit de légères torsions, d'autant plus que le sujet a le bassin large (cas des femmes) et les jambes courtes. Mais, à mesure que le rythme et la vitesse augmentent, on voit s'atténuer ces diverses oscillations, et le corps demeure, pour ainsi dire, constamment sur sa ligne de progression ; on tend, en un mot, vers un régime de progression économique.

Enfin, pour les raisons déjà données, les oscillations des bras déterminent leur degré de flexion en proportion de la vitesse.

D'après ce qui vient d'être expliqué, on comprend que, dans la course, le travail musculaire revienne surtout aux fléchisseurs de la jambe. Toutefois ceux de la cuisse et les muscles fessiers, en général, se contractent au début de l'oscillation et pendant la suspension. L'équilibre du tronc fait aussi contracter plusieurs muscles. La course ne peut être rapide que si la cage thoracique demeure droite et permet des inspirations de grande amplitude. L'expérience a, d'autre part, montré que l'on doit courir en flexion pour faire un bon emploi de ses forces, couvrir une grande dis-

tance et diminuer les oscillations si fatigantes du corps (Regnault).

**295. Travail musculaire dans la course.** — On a tenté (Marey et Dëmeny) de calculer le travail musculaire relatif *au pas* dans la course en fonction de la cadence. Et l'on a obtenu la courbe de la figure 276 que nous faisons précéder de celle de la marche. Elle montre que la course est éco-

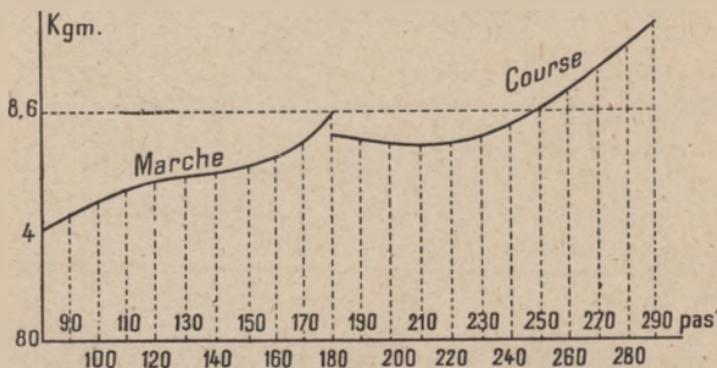


FIG. 276. — Variations du travail en fonction de la cadence (d'après Marey).

nomique aux environs de 220 pas à la minute, et qu'elle l'est plus qu'une marche rapide de 160 à 170 pas.

Les valeurs absolues qui ressortent du graphique ne sont pas rigoureuses ; elles laissent voir, cependant, pourquoi l'on préfère substituer le pas de course au pas de marche rapide. Ajoutons que, dans ce dernier cas, les jambes éprouvent une sensation très douloureuse par suite de l'extension forcée qu'elles doivent conserver. Le pas de course produit, au contraire, une flexion des membres inférieurs qui rend possible une grande vitesse de progression sans entraîner la douleur.

**296. Le saut.** — Le saut <sup>(1)</sup> est un mouvement de détente musculaire qui projette le corps en haut et lui fait parcourir

(1) Marey (*Comptes Rendus Sciences*, t. CIII ; 1888) ; du Bois-Reymond, *Zur Physiologie des Springens* (*Arch. f. anat. u. physiol. Abt. Suppl.*, 1905, p. 329).

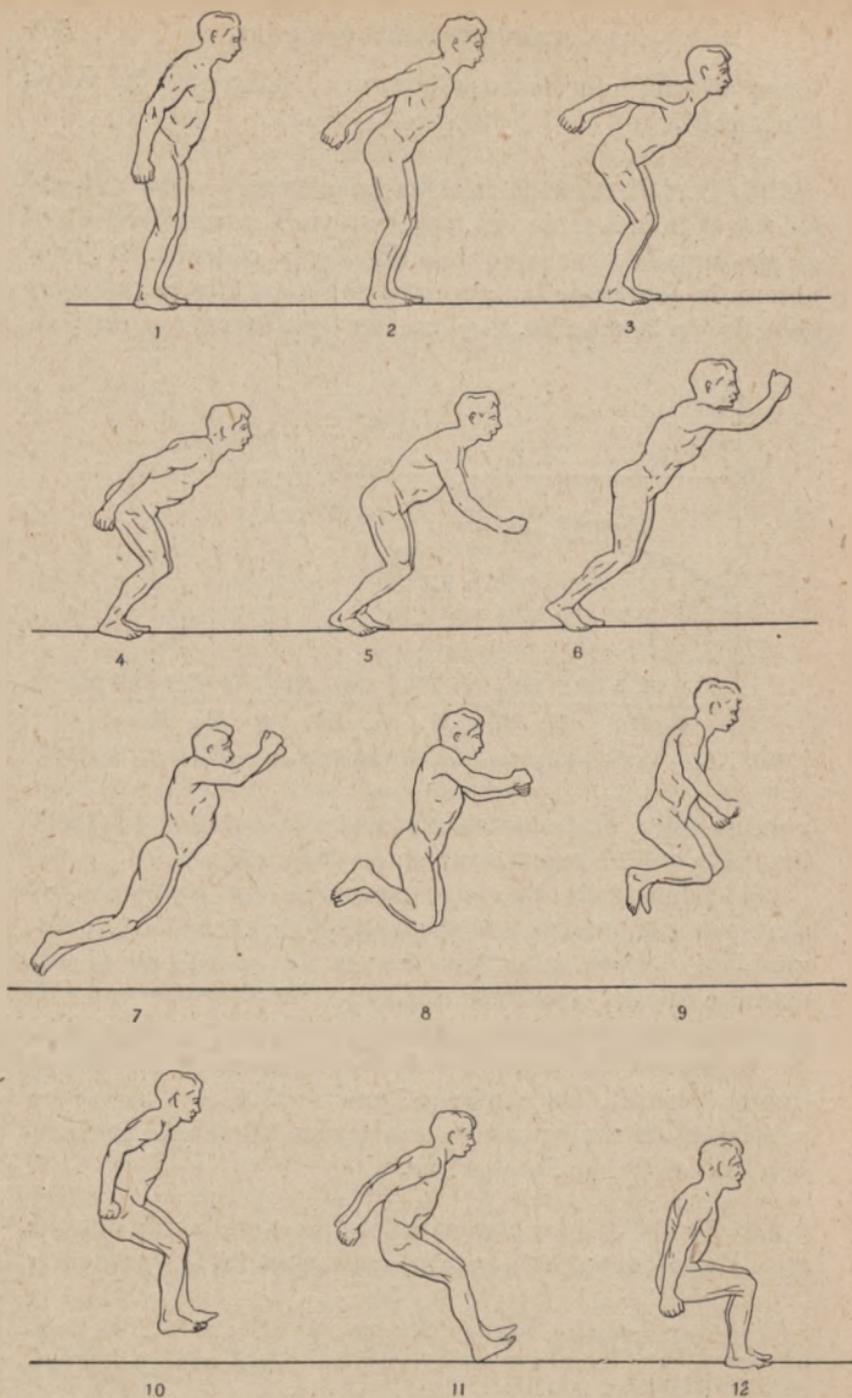


FIG. 277. — Différentes phases du saut (d'après les chronophotographies de Richer et Londe).

un certain espace durant qu'il est ainsi suspendu. Le corps se trouve alors animé d'une grande vitesse.

Les lois du saut sont celles du mouvement des projectiles (§ 274); les conditions de sa production sont les suivantes : une phase de *préparation* dans laquelle le tronc se porte en avant, les membres inférieurs fléchissent et les bras reculent; une phase d'*impulsion* due à la contraction brusque des muscles du mollet (triceps) et de la cuisse (quadriceps); les bras se tendent en haut et le corps développe une *quantité de mouvement*  $MV$  (§ 29); après quoi la *chute* se produit, on peut même considérer qu'elle débute au contact du sol, lorsque les pieds y affleurent par les talons; jusque-là c'est la phase de *suspension*. Les chronophotographies de la figure 277, dues à Richer et Londe, analysent les périodes de ce mouvement; elles montrent qu'à la chute les muscles font office de freins pour amortir le choc et préparer le contact avec le sol; une chute non amortie, sur les talons, peut déterminer des troubles cérébraux.

La pression des pieds (fig. 278) est plus faible dans le premier cas (1) que dans le second (2). Elle atteint en moyenne 200 kilogrammes, d'après nos graphiques pris au

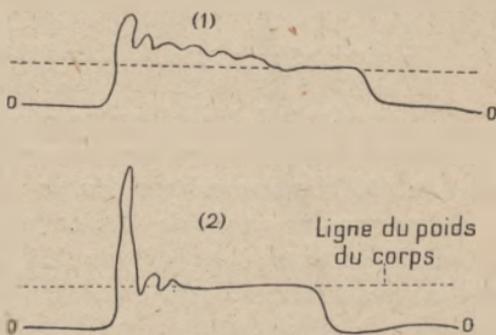


Fig. 278. — Pressions des pieds dans le saut :  
1, chute amortie ; 2, chute non amortie.

Trottoir, soit 3 à 4 fois le poids du corps. La relation  $F \times t = MV$  fournit la vitesse du saut; on a généralement 7 mètres (car  $t = 0^{\text{sec}},20$  à  $0^{\text{sec}},25$ ).

Le saut avec une seule jambe ou unilatéral est plus avantageux que le saut bilatéral, car il diminue l'effet de traction vers le bas au moment de l'impulsion; la vitesse horizontale du corps, à cet instant, diminue aussi, puisqu'elle fait place à une vitesse verticale résultant de cette impulsion.

En définitive, ce sont les muscles des jambes et des épaules qui fournissent le plus de travail chez les sauteurs;

aussi les ont-ils souvent très développés. D'autre part, la masse du corps est un élément important, vu que la hauteur du saut est inverse de cette masse; les personnes ayant les jambes longues sautent également plus haut que les autres.

Quant à l'évaluation du travail correspondant au saut, elle conduit à des résultats très variables. L'homme est lancé comme un obus avec une vitesse initiale  $v$ ; d'où un travail :

$$E_1 = \frac{1}{2} mv^2;$$

puis la pesanteur effectue un travail que les muscles ne peuvent aucunement modifier, sauf qu'ils peuvent disposer le corps à amortir le choc. Dans son ensemble, le travail musculaire est difficile à évaluer. On peut, tout au plus, s'en faire une idée : un homme pesant 65 kilogrammes quitte le sol à une vitesse de 8 mètres par seconde; d'où :

$$E_1 = \frac{1}{2} \times \frac{65}{9,81} \times 8 \times 8 = 212 \text{ kilogrammètres.}$$

Si l'on y ajoute le travail préparatoire de la course nécessaire pour se donner un élan, on arrivera facilement à un total de 300 kilogrammètres. En se lançant, à la vitesse de 8 mètres sous un angle de  $45^\circ$ , on parcourt  $6^m,52$  (§ 26). On a donc à comparer  $6,52 \times 65 = 424$  mètres-kilogrammes et 300 kilogrammètres, soit environ  $0^{kgm},77$  par mètre-kilogramme.

A l'Olympiade d'Anvers (août 1920), Petersen réussit un saut en longueur de  $6^m,94$  : ce qui suppose une vitesse initiale d'au moins  $8^m,25$ .

297. 4° *Le grimper*. — Dans le grimper, les membres supérieurs tirent le corps vers le haut : les coudes sont plus ou moins fléchis, mais ce sont les muscles puissants des épaules, du dos et les grands pectoraux, qui agissent efficacement. Toutefois l'homme est, à cet égard, moins favorisé que les anthropoïdes, le singe notamment. D'un autre côté, le gros orteil intervient pour résister au glissement du corps; chez les sauvages il a des fonctions parfaitement définies sous ce rapport.

Par cela même que les muscles des bras ne possèdent pas la puissance de ceux des jambes, leur travail, dans le grimper, est très fatigant : il est contraire aux données anatomiques et physiologiques.

298. 5° *Le ramper*. — Nous avons laissé le dernière mode de locomotion, qui consiste à marcher sur les genoux et les mains ; on en a même fait des applications thérapeutiques, à cause des multiples inflexions qu'il donne à la colonne vertébrale (1). Le ramper est très pénible ; il n'est à recommander ni dans les jeux ni dans les exercices militaires, à moins de nécessité. Il donne lieu à des formations calleuses aux endroits qui frottent constamment sur le sol.

Dans l'Inde, les enfants, poursuivis par les loups, rampent avec une agilité surprenante, au témoignage des explorateurs (2).

De tous les modes de locomotion que nous venons de décrire, la marche et la course sont les plus intéressantes.

299. LOCOMOTION DANS L'EAU : DU NAGER DE L'HOMME (3). — Nous ne donnerons pas trop de détails sur le nager de l'homme, parce qu'il est bien plus d'ordre sportif que professionnel. Les actions de milieu sont ici très importantes, et le travail musculaire du nageur s'y ajoute. Ce dernier se maintient à la surface de l'eau, de densité voisine de la sienne ; et comme son centre de gravité est plus près de son dos que de son ventre, il flotte en se retournant sur le dos ; il s'aide des mouvements de bas en haut de ses bras, et du gonflement de ses poumons (voir § 189). S'il vient à sortir la tête entièrement de l'eau, il s'enfonce, les pieds touchent le fond et le corps demeure dans une position inclinée. Les deux positions d'équilibre dans l'eau consistent à reposer sur les genoux et les orteils, la tête penchée en avant, ou sur les talons, la tête rejetée en arrière. Il ne faut pas entrer dans l'eau la tête en avant, et brusquement. Le choc serait dur, l'eau étant incompressible.

(1) Klapp (*Münsch. Med. Wochensch.*, t. LII, n° 48, p. 2311 ; 1905).

(2) V. Ball, *Jungle life in India*. London, 1880, p. 454. Steermann, *A. Journey through the kingdom of Oude, 1849-1850*, London, 1858.

(3) R. Thomas, *Swimming*, London, 1904.

Pour progresser, ce sont les membres inférieurs qui se détendent après s'être fléchis; l'eau est repoussée par la plante des pieds. Quant aux bras, ils frappent l'eau comme des tranchants et le corps s'avance en droite ligne: ils décrivent latéralement des cercles, tandis que les mains jouent le rôle d'avirons.

Le travail des muscles des membres est considérable dans la natation, surtout s'il faut progresser contre un courant d'une certaine force (§ 189); la température agit sur la déperdition calorifique, et dans l'ensemble la dépense d'énergie est très élevée. En principe, le nageur adopte la position horizontale couchée, afin d'offrir à l'eau une résistance minimum. Dans « l'over arm stroke » chaque bras agit isolément; on n'avance pas vite, on respire bien, et la fatigue n'est pas grande. Le mouvement est plus rapide dans le « trudgen » et la respiration doit se régler sur les gestes du bras droit. On avance très vite dans le « crawl », sorte de nager sur le ventre, où l'équilibre stable est assuré par les battements des pieds. Mais ici la tête est immergée; il faut une bonne réserve d'air dans les poumons. Ce n'est pas à la portée de tous les nageurs.

Le fameux Burgess, traversant la Manche entre le cap Gris-Nez et Douvres, mit 23 heures 50 minutes pour parcourir 36<sup>km</sup>,200 environ, soit 1<sup>km</sup>,53 à l'heure. Il est vrai qu'ayant « louvoyé », il prétend avoir atteint une vitesse de 2<sup>km</sup>,800 à l'heure <sup>(1)</sup>; et l'on s'est souvenu qu'à Joinville-Pont, cinq ans auparavant, il avait parcouru 44 kilomètres en 24 heures, soit 1<sup>km</sup>,860 à l'heure. A la vitesse moyenne de 1<sup>km</sup>,800, et contre un courant de 2 mètres, le travail par heure s'élève à :

$$73 \times 0,035 \times 2,50 \times 1.800 = 28.734 \text{ kilogrammètres,}$$

une puissance de 8 kilogrammètres environ.

Les femmes nagent plus facilement que les hommes, encore que moins fortes. Ainsi, à l'Olympiade d'Anvers (août 1920), Suzanne Wurtz, nageuse française, parcourut

<sup>(1)</sup> *Le Matin* du 7 septembre 1911, complété par *le Temps* du même jour, Burgess absorbait, en cours de route, chocolats et bouillon, mais point d'alcool.

les 100 mètres en près de 75 secondes, soit une vitesse de  $4^{\text{km}},800$  à l'heure, et les 300 mètres en 330 secondes.

300. La dépense énergétique dans la locomotion de l'homme. — La marche. — Les mesures de dépense énergétique consistent dans l'évaluation en calories de l'oxygène consommé par le sujet qui marche, et la dépense dynamique sera l'excès de cette consommation sur celle de l'homme au repos.

Zuntz inaugura brillamment cette étude, et son livre : *Studien zu einer Physiologie des Marsches* (1), reçut les plus hautes approbations militaires de l'Allemagne. Sa méthode a servi à presque tous les chercheurs (Amar, Kolmer et Brézina, Benedict, Murschauser, Smith), qu'il se soit agi de la marche en palier, ou sur un sol incliné, que le but ait été d'ordre professionnel, ou simplement sportif. Zuntz observait, en même temps que le prix (en oxygène ou calories) du pas marché, les phénomènes respiratoires et circulatoires, les modifications nerveuses qui en étaient la suite. Ses expériences ont porté sur cinq sujets de  $1^{\text{m}},70$  à  $1^{\text{m}},81$  de taille, et d'un poids de 65 à 80 kilogrammes. Nous y choisissons le numéro qui pèse 65 kilogrammes, poids moyen d'un adulte ; taille de  $1^{\text{m}},69$  et longueur du membre inférieur égale à  $0^{\text{m}},86$ .

A la vitesse de 4.588 mètres à l'heure, sa dépense dynamique fut de  $0^{\circ},574$  par kilogramme de son poids et par mètre parcouru, unité que nous avons dénommée *metre-kilogramme* ; c'est un peu plus de  $\frac{1}{2}$  petite calorie. De l'ensemble des expériences, Zuntz a déduit une moyenne de  $0^{\circ},518$  par mètre-kilogramme, à une vitesse horaire voisine de 4.500 mètres. Nous avons obtenu (2), dans les mêmes conditions,  $0^{\circ},506$ , ainsi, d'ailleurs, que différents auteurs (3).

(1) Zuntz et Schumburg, *Studien zu einer Physiologie des Marsches*, Berlin, 1901 (in-8° de 361 pages).

(2) Jules Amar (*Journ. de Physiol.*, mars 1911, p. 242).

(3) Leo Zuntz, A. et I. Loewy (*Pflüger's Arch.*, t. LXVI, p. 477) ; W. Kolmer et E. Brézina (*Biochemische Zeitsch.*, t. XXXVIII, p. 129 ; 6 janvier 1912) ; — Brézina et H. Reichel (*Ibid.*, t. LXIII ; 28 mai 1914).

La vitesse modifie considérablement la dépense d'énergie. Entre 2<sup>km</sup>,900 et 8<sup>km</sup>,900 à l'heure, celle-ci varie de 0<sup>c</sup>,4 à

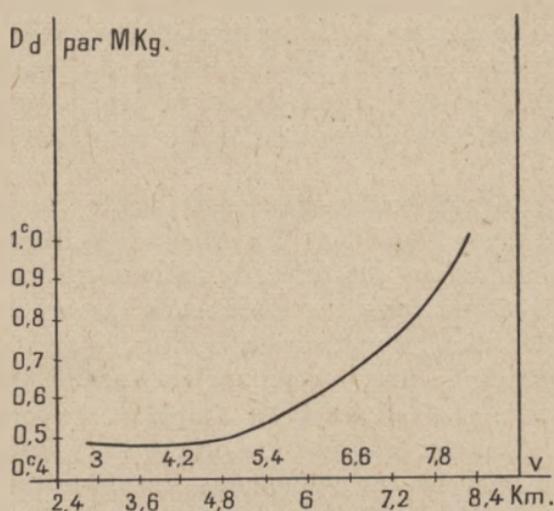


FIG. 279. — Dépense dynamique par mètre-kilogramme à différentes allures.

0<sup>c</sup>,9 environ, comme le montre le graphique (fig. 279); un minimum apparaît à la vitesse de 4.500 mètres; c'est, pour l'homme marchant à vide, l'allure économique.

Faisons le calcul suivant : si un adulte de 65 kilogrammes marche à 5<sup>km</sup>,4 à l'heure, il dépense 0<sup>c</sup>,56 par mètre-kilogramme, soit :

$$0,56 \times 65 \times 0,78 = 28^c,392$$

à chaque pas de 0<sup>m</sup>,78; et nous nous trouvons dans les conditions du sujet de Braune et Fischer, dont le travail musculaire a été évalué à 6 kilogrammètres (§ 285). Évaluant aussi la dépense en kilogrammètres, nous aurons un rendement net de :

$$\frac{6}{28,392 \times 0,425} = 49 \text{ 0/0 environ.}$$

C'est un rendement considérable, d'après lequel on est en droit de suspecter toutes les évaluations concernant le travail musculaire dans la locomotion.

Nous basant sur la seule dépense d'oxygène, nous dirons que l'homme doit consommer de 0<sup>c</sup>,50 à 0<sup>c</sup>,60 par mètre-kilogramme aux vitesses normales de 4 à 6 kilomètres à l'heure, en marchant à vide ; et, en outre, que la vitesse économique est celle de 4<sup>km</sup>,500 (Amar).

301. Les expériences précédentes ne manquent pas d'homogénéité ; elles peuvent être consultées avec confiance, l'er-



FIG. 280. — Appareil respiratoire portable de Zuntz.

reur probable atteignant  $\frac{2}{100}$  en plus ou en moins des valeurs indiquées.

Zuntz faisait parcourir une distance variable à ses sujets pendant au moins huit à dix minutes ; il faut, toutefois, considérer que, dans ces expériences, l'homme porte le compteur à gaz sur ses épaules, avec un dispositif pour réaliser un échantillonnage ; le parcours est donné par un tachymètre placé sur le sommet de la tête (*fig.* 280).

Amar place le compteur dans un havresac quand il s'agit d'effectuer une longue marche ; mais généralement il sup-

prime le port du compteur, et l'homme parcourt une piste de 11 mètres seulement un nombre de fois suffisant pour



FIG. 281. — Dispositif pour mesurer la consommation d'oxygène dans la marche (Jules Amar).

marcher trois minutes. Les gaz sont mesurés au compteur disposé sur une table où un appareil à double dérivation permet de prélever des échantillons, au repos, puis en marche (fig. 281 et 230). Kolmer et Brezina ont employé l'appareil de Zuntz et adopté une piste de 155 mètres environ.

302. Marche avec fardeaux. — La dépense d'énergie augmente pour l'homme chargé. A une allure de  $4^{km},500$  et sous une petite charge de  $7^{kg},300$ , l'augmentation totale a été de  $\frac{1}{5}$  environ (Amar); mais, rapportée au mètre-kilogramme, elle varie suivant la grandeur du fardeau et la vitesse. Considérons des charges de 11 à 53 kilogrammes et des vitesses horaires de 3.000 à 6.600 mètres, nous aurons le tableau suivant, dû à Kolmer et Brezina, donnant le coût du mètre-kilogramme :

| VITESSE<br>HORAIRE<br>de | POIDS DU SUJET + CHARGE |                     |                     |                     |                     |                     |
|--------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                          | 70 KILOGR.<br>(à vide)  | 70 + 11             | 70 + 21             | 70 + 33             | 70 + 43             | 70 + 53             |
| 3.000 m.                 | 0 <sup>c</sup> ,486     | 0 <sup>c</sup> ,463 | 0 <sup>c</sup> ,490 | 0 <sup>c</sup> ,485 | 0 <sup>c</sup> ,542 | 0 <sup>c</sup> ,547 |
| 3.600                    | 0,508                   | 0,466               | 0,497               | 0,484               | 0,545               | »                   |
| 4.200                    | 0,508                   | 0,464               | 0,454               | 0,506               | 0,575               | 0,673               |
| 4.800                    | 0,517                   | 0,474               | 0,498               | 0,523               | 0,600               | »                   |
| 5.400                    | 0,537                   | 0,531               | 0,534               | 0,575               | 0,690               | 0,695               |
| 6.000                    | 0,566                   | 0,602               | 0,605               | 0,651               | 0,842               | »                   |
| 6.600                    | 0,653                   | 0,688               | 0,724               | 0,773               | »                   | »                   |

Coût du mètre-kilogramme.

Les dépenses les plus économiques pour une charge donnée, en fonction de la vitesse, sont marquées en italique et l'on trouve que l'*optimum économique* par excellence est celui que réalisent une charge de 21 kilogrammes et une vitesse horaire de  $4^{km},200$  (voir § 288).

Mais le problème industriel consiste à rechercher la production maximum de travail journalier; en d'autres termes, les conditions de vitesse et de charge qui, dans un temps donné, assurent le travail le plus grand, à *fatigue constante*. Nous apprécions cette fatigue d'après la dépense d'énergie. Or ce sont là des questions d'espèces, puisque le transport des fardeaux est suivi de *retours à vide* qu'il est nécessaire de rendre moins fréquents; et puisque aussi l'ouvrier est

souvent obligé de marcher à pleine charge, n'ayant que la possibilité de modifier son allure. Faisons donc produire à l'homme de 4.000 à 12.000 mètres-kilogrammes par minute, en variant charge et vitesse; nous aurons l'intéressant tableau qui suit :

| NOMBRE<br>DE MÈTRES-<br>KILOGRAMMES<br>par<br>minute | POIDS DU SUJET + CHARGE |                      |                      |                      |                      |                      |
|--|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|  | 70 KILOGR.<br>(à vide)  | 70 + 11              | 70 + 21              | 70 + 33              | 70 + 43              | 70 + 53              |
| 4.000  | 0 <sup>c</sup> ,4999    | 0 <sup>a</sup> ,4630 | 0 <sup>a</sup> ,4332 | 0 <sup>c</sup> ,4690 | 0 <sup>c</sup> ,4957 | »                    |
| 5.000  | 0,4978                  | 0,4323               | 0,5106               | 0,5332               | 0,5331               | »                    |
| 6.000  | 0,5093                  | 0,4469               | 0,4618               | 0,4440               | 0,5560               | 0 <sup>c</sup> ,5340 |
| 7.000  | 0,5640                  | 0,4990               | 0,4757               | 0,4920               | 0,5465               | »                    |
| 8.000  | 0,6901                  | 0,5913               | 0,5436               | 0,5485               | 0,5825               | »                    |
| 9.000  | 0,7867                  | 0,6814               | 0,5576               | 0,4981               | 0,5526               | 0,5665               |
| 10.000   | 0,8652                  | 0,8804               | 0,7252               | 0,6060               | 0,6959               | »                    |
| 11.000   | »                       | 9,9185               | 0,8717               | 0,7012               | 0,7995               | 0,6907               |
| 12.000   | »                       | »                    | »                    | 0,8181               | »                    | 0,7105               |

Coût du mètre-kilogramme.

Voulons-nous, par exemple, faire transporter un fardeau de 43 kilogrammes? Le plus économique sera d'adopter un taux de production égal à 4.000 mètres-kilogrammes par minute, ce qui correspond à une faible vitesse :

$$\frac{4.000}{70 + 43} \times 60 = 2.124 \text{ mètres à l'heure.}$$

Voulons-nous, au contraire, un maximum de puissance? Pour 10.000 mètres-kilogrammes par minute, nous choisirons une charge de 33 kilogrammes; et c'est alors une vitesse horaire de :

$$\frac{10.000}{70 + 33} \times 60 = 5.825 \text{ mètres.}$$

Pour 11.000 mètres-kilogrammes, on adoptera une charge

très élevée : 53 kilogrammes, d'où une vitesse de :

$$\frac{11.000}{70 + 53} \times 60 = 5.366 \text{ mètres à l'heure}$$

et c'est un *maximum maximorum*.

De tous ces chiffres il ressort clairement que, pour développer une grande puissance, on doit marcher à pleine charge, 53 kilogrammes, et vitesse de 5<sup>km</sup>,366 ; sinon — et c'est l'espèce d'ouvriers employés qu'il faut ici considérer — l'abaissement de la charge à 33 kilogrammes sera compensé par une plus grande vitesse, voisine de 5,8 kilomètres. Il faut enfin, envisager la difficulté de soutenir longtemps ce travail à pleine charge, même avec des repos très fréquents <sup>(1)</sup>.

**303. Expériences sur le transport des fardeaux.** — Les bases de cette expérimentation si intéressante ont donc un défaut : la mesure de la dépense d'énergie concerne une durée très courte, de deux à trois minutes. Aussi, la compléterons-nous par les données suivantes relatives au transport de fardeaux par des hommes bien entraînés, parcourant plusieurs kilomètres par jour, durant sept à huit heures. Point de marche à vide, ni de retours, mais des intervalles de repos de deux à cinq minutes après chaque kilomètre, ou de une à deux minutes tous les 600 mètres ; en un mot les conditions de travail sont celles du régime libre et volontaire. Voici le tableau <sup>(2)</sup> des résultats concernant la production la plus grande et la plus économique de l'ouvrier, la journée étant généralement de huit heures et demie.

<sup>(1)</sup> Il est clair que si l'on a des charges supérieures à faire transporter, par exemple des traverses de bois pesant 100 kilogrammes, on emploiera deux hommes, choisis d'égale taille autant que possible, etc.

<sup>(2)</sup> Jules Amar, *le Rendement de la machine humaine*, p. 72.

| HOMME<br>+ CHARGE | VITESSE<br>HORAIRE | PARCOURS<br>TOTAL | COUT<br>du<br>mètre-kilo-<br>gramme | DATES<br>des<br>OBSERVATIONS                             |
|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------------------------|--|
| 67 + 45 kg.       | 4.320 m.           | 24.300 m.         | 0°,301                              | Au mois d'août 1908.                                     |
| 67 + 45           | 4.824              | 13.568            | 0,402                               | — d'août 1908.   |
| 66,2 + 45         | 4.320              | 21.430            | 0,305                               | — de dec. 1908.  |
| 64,7 + 45         | 4.320              | 17.850            | 0,297                               | — de janv. 1909.   |
| 69,4 + 45         | 4.824              | 18.380            | 0,329                               | — —  |
| 69,0 + 45         | 5.400              | 25.930            | 0,309                               | — de sept. 1908.   |
| 71 + 45           | 4.824              | 12.060            | 0,257                               | — de mai 1908.   |
| 71,4 + 45         | 4.824              | 29.980            | 0,289                               | Au mois de dec. 1908<br>(excell <sup>nt</sup> marcheur). |
| 71 + 45           | 4.824              | 25.930            | 0,345                               | Au mois de sept. 1908.                                   |
| 71,5 + 45         | 4.320              | 22.311            | 0,277                               | — —  |
| 78 + 45           | 5.400              | 21.450            | 0,302                               | — de janv. 1909.   |
| 59 + 45           | 4.824              | 18.900            | 0,285                               | — de mai 1908.   |
| 72,6 + 60         | 4.824              | 21.146            | 0,324                               | — de nov. 1908.  |
| 74,5 + 60         | 4.320              | 19.055            | 0,335                               | — d'août 1908.   |
| 75,1 + 60         | 4.320              | 16.540            | 0,310                               | — de sept. 1908.   |

La moyenne du coût du mètre-kilogramme est 0°,311, aux vitesses extrêmes de 4.000 à 5.000 mètres à l'heure, et en travail continu, volontaire. Il faut remarquer que les cultivateurs et bergers du nord de l'Afrique, qui avaient servi à ces expériences, observent la *marche en flexion*, ayant une très grande habitude de la locomotion à pleine charge. Leur entraînement est connu par l'exemple des *rekkas* ou courriers qui parcourent des centaines de kilomètres à une bonne allure et avec une activité musculaire moins dispendieuse que la nôtre.

Sur cette même catégorie de sujets, nous avons obtenu au bicycle à frein (§ 231) un rendement net de 32,5 0/0. La dépense de 0°,311 nous permet donc de calculer le travail correspondant *au pas* : un adulte de 65 kilogrammes dépense  $65 \times 0°,311$ , et parcourt 1 mètre; s'il fait un pas de 0<sup>m</sup>,78, sa dépense sera :

$$65 \times 0,311 \times 0,78.$$

Le travail s'en déduit, on a :

$$\mathcal{E} = 65 \times 0,311 \times 0,78 \times 0,325 \times 0,425 = 2^{\text{kgm}}, 18.$$

La vitesse ne doit à aucun prix dépasser 5.000 mètres dans le transport de lourdes charges. Ainsi :

« Un homme de 71 kilogrammes marchant avec un sac de 60 kilogrammes sur les épaules, à la vitesse horaire de 4.824 mètres, parcourt dans sa journée 22<sup>km</sup>,311. En portant l'allure à 5.400 mètres, il n'a pu faire que 12<sup>km</sup>,140, un peu plus de la moitié. Les plus grands parcours ont été obtenus, marchant à 4.824 mètres et avec charge de 45 kilogrammes. Les expériences ont pu se prolonger sans fatigue, sans récriminations sérieuses de la part des intéressés, pendant huit à dix jours consécutifs pour chacun (1). »

L'activité journalière maximum est représentée par :

$$(71 + 45) 25.930 = 3.007.880 \text{ mètres-kilogrammes.}$$

C'est incontestablement le plus grand résultat possible.

**304. Observations et méthode de Coulomb.** — Le premier de tous les observateurs, Coulomb (2) détermina le travail maximum de l'homme qui transporte des fardeaux ; il nota la diminution de travail par accroissement de charge à la vitesse normale du sujet, et par journée. Appliquant à ce résultat le calcul des *variations*, il obtint une charge de 62<sup>kg</sup>,300 et un parcours total de 17<sup>km</sup>,320 pour un homme de 70 kilogrammes, soit :

$$17.320 (70 + 62,3) = 2.291.436 \text{ mètres-kilogrammes.}$$

Il est inutile de faire ressortir que le calcul a certainement trompé l'illustre physicien, et que seules des bases physiologiques peuvent conduire à rejeter toute valeur de la charge trop fatigante pour les muscles. D'autre part la science de l'énergie était insoupçonnée, et personne n'avait égard au gaspillage qu'entraînent les *efforts statiques*, les *mouvements inutiles*, ni aux avantages de la vitesse et de la charge optima comme les ont établis, depuis, Chauveau et tous ceux qui se rattachent à son école. Les *retours à vide*, notam-

(1) Jules Amar (*loc. cit.*, p. 73).

(2) Coulomb (*loc. cit.*); voir le paragraphe 129.

ment, constituent une dépense d'énergie supplémentaire si on ne diminue pas leur fréquence.

Ces principes ont guidé l'ingénieur américain Frédéric Taylor (§ 200), qui expérimenta sur l'homme dans des conditions telles que la santé ne pût en souffrir. Exemple :

**305. Manutention des gueuses de fonte.** — C'est, évidemment, une des formes de travail les plus rudimentaires. L'ouvrier doit se baisser, saisir une gueuse de fonte de 42 kilogrammes et la déposer quelques pas plus loin. 80.000 tonnes de fonte étaient ainsi empilées le long d'une voie de chemin de fer. L'ouvrier, ou une équipe d'ouvriers, prenaient les gueuses une à une sur le tas, montaient sur un plan incliné et les plaçaient dans un wagon.

A la Bethlehem Steel Company, on chargeait 12,50 par homme et par jour. Taylor parvint à élever ce nombre à 47 tonnes. Voici comment : depuis 1884, comme chef d'atelier de la Midvale Steel Company, il avait étudié les conditions de *vitesse* et de *durée* du travail humain, après s'être renseigné sur tout ce qui avait été tenté avant lui, et qu'il estima vraiment insuffisant <sup>(1)</sup>. Ses expériences furent ainsi conduites : « On choisit deux ouvriers de premier ordre qui s'étaient montrés vigoureux, réguliers et habiles. Ces hommes reçurent double paye pendant la durée des expériences, à la condition qu'ils travailleraient de leur mieux à tout moment; on ne leur cacha pas qu'on contrôlerait de temps en temps, par des expériences, s'ils n'essayaient pas de flâner, et qu'à la première tentative de tromperie, ils seraient congédiés. Ces ouvriers travaillèrent de leur mieux pendant tout le temps qu'ils furent en observation. » C'est, on le voit, la méthode de Coulomb, complétée par celle de Chauveau.

Ainsi disposés et contrôlés, ces hommes furent appliqués à des tâches variées. On notait, avec un compteur à secondes, le temps nécessaire à *chacun des mouvements* qu'ils faisaient, on étudiait et enregistrait tout élément du travail présentant quelque intérêt. Mais on reconnut que, suivant

(1) Voir les mémoires de l'auteur à l'American Society of Mechanical Engineers : *A piece rate System et Shop management, et Organisation scientifique des usines* (loc. cit.).

les besognes, l'homme pouvait développer de  $\frac{1}{8}$  à  $\frac{1}{2}$  cheval-heure, soit de 34.000 à 140.000 kilogrammètres par journée, de sorte qu'il ne parut pas y avoir une relation rigoureuse entre le travail et la fatigue (voir ce qui a été dit, § 132 et 137), et d'autre part il fallait *choisir* les ouvriers.

On reprit plus tard la même étude, et on confia les résultats de nombreuses observations à un mathématicien, M. Barth, qui en déduisit la *loi des rapports du travail et de la fatigue* (?), le travail consistant en exercices de force, tels que traction, pression sur une résistance qui cède, etc. Tout d'abord on trouva que l'homme ne doit être chargé que pendant une durée parfaitement définie, soit 43 0/0 de la journée dans la manutention des gueuses; les 57 0/0 de son temps, il doit rester les mains vides.

On pourrait le charger  $\frac{58}{100}$  de la journée si on lui faisait manutentionner des demi-gueuses de 22 kilogrammes. Et enfin, il existe une *charge limite* qu'il porterait sans fatigue *continuellement* dans sa journée.

Ces faits, reconnus par Barth et Taylor, avaient été déjà mis en évidence, quant à la dépense d'énergie, par les expériences de Chauveau et ses élèves. Les uns et les autres se complètent et se confirment. Mais il est clair que le savant américain s'était inspiré principalement de la méthode de Coulomb.

Il remarque que l'*effort statique* fatigue les muscles et oblige à intercaler dans le travail des intervalles de repos; mais il n'exprime ni ne démontre une *formule générale*, comme l'établira plus tard Chauveau (§ 120). Toujours est-il que, surveillant la durée des mouvements, les triant, en quelque sorte, pour éliminer ceux dont l'utilité ne se faisait pas sentir, Taylor réussit à faire charger 47 tonnes de fonte au lieu de 12<sup>t</sup>,5 par homme et par jour. Le travail représentait le chargement de 1.156 gueuses de 41<sup>kg</sup>,4 chacune, et durait 252 minutes (en charge) sur 600; c'était, par gueuse, une durée de 13<sup>s</sup>,20.

L'homme marchait à plat à la vitesse de 0<sup>m</sup>,83 par seconde (3 kilomètres à l'heure), et parcourait 11 mètres pour atteindre

le wagon, c'est-à-dire 26 kilomètres par jour, dont la moitié en portant les gueuses. Ce résultat corrobore le nôtre (§ 303) sur le transport de fardeaux de 45 à 50 kilogrammes, dans lequel des sujets entraînés purent effectuer jusqu'à 30 kilomètres : leur vitesse était, d'ailleurs, de 1<sup>m</sup>,34. La faible distance (11 mètres) à parcourir, dans les expériences de Taylor, devait porter les ouvriers à ralentir leur allure; cependant quelques-uns d'entre eux dépassèrent la vitesse de 0<sup>m</sup>,83 et chargèrent jusqu'à 58 tonnes par jour.

Le nombre maximum de mètres-kilogrammes par jour, avec des ouvriers de 75 kilogrammes, fut donc :

$$\begin{array}{r} (75 + 41,4) 13.000 = 1.513.200 \text{ mètres-kilogr. à l'aller} \\ 75 \times 13.000 = \quad 975.000 \quad \text{—} \quad \text{au retour} \\ \hline \text{Ensemble... 2.488.200 mètres-kilogrammes.} \end{array}$$

Ce résultat est doublement intéressant : il montre d'abord que, dans certaines conditions, l'homme peut accroître son rendement en réglant sa vitesse et son effort, et en prenant des repos déterminés; mais il révèle aussi l'insuffisance des méthodes empiriques qui, dans le cas présent, consistaient à se fier, en quelque sorte, à un *ouvrier étalon*. Taylor aurait dû accélérer le mouvement de ses équipes jusqu'aux environs de 4, 5 kilomètres à l'heure et multiplier les repos. Il faut aussi remarquer que le transport des gueuses était précédé de leur *souèvement* jusqu'à hauteur de la ceinture; qu'elles étaient déposées dans un wagon auquel conduisait un *petit plan incliné*; et qu'enfin les *retours à vide* étaient trop nombreux; conditions, dans leur ensemble, différentes de celles d'un transport coupé simplement de haltes pour restaurer les forces. Ainsi, la méthode de Taylor, fondée sur le *chronométrage* des mouvements, n'est pas à l'abri des objections d'ordre physiologique. Elle est utile, mais incomplète (voir plus loin).

**306. Observations diverses.** — Amontons (1) cite le cas des porteurs de *hottes* : la hotte pèse 14<sup>kg</sup>,700, la distance à parcourir est

(1) Amontons (*Hist. acad. Roy. Sciences*, 1703, p. 104).

de 721 mètres ; les hommes faisaient 22 voyages par jour, et c'était certainement tout ce qu'ils pouvaient faire, car ils étaient à leur tâche. On a donc :

$$721 \times 22 = 15.862 \text{ mètres sous charge,}$$

et autant à vide. D'où :

$$15.862(70 + 14,70) + 15.862 \times 70 = 2.453.851 \text{ mètres-kilogrammes,}$$

nombre très voisin de celui qu'a obtenu Taylor ; mais, ici encore, vitesse et charge sont insuffisantes et mal combinées.

Diverses autres observations (sur des portefaix de Rive-de-Gier, dans la Loire, sur des colporteurs) ont donné 2.430.000, 2.257.200 et 2.280.000 mètres-kilogrammes, avec des charges de 85, — 50 et 44 kilogrammes.

Des exemples empruntés à l'infanterie prouvent que le soldat français peut faire, normalement, 30 kilomètres avec un chargement moyen de 30 kilogrammes, soit :

$$(70 + 30) 30.000 = 3.000.000 \text{ de mètres-kilogrammes.}$$

Dans certains cas (marches d'épreuve, raids), ce résultat est dépassé. La vitesse est généralement voisine de 5.500 mètres.

Au témoignage de l'écrivain militaire Végèce, le soldat romain pouvait parcourir 36 kilomètres sous un chargement de 29 kilogrammes.

**307. Le piétinement** <sup>(1)</sup>. — Dans les marches de l'infanterie, on fait souvent usage du *piétinement* comme s'il était presque équivalent au repos. En réalité, on ne fait que supprimer la *progression*, le travail musculaire des oscillations du corps conservant à peu près la valeur qu'il a dans la marche.

Considérons comme nulles les oscillations latérales du corps, et admettons que, dans le piétinement, seules les jambes soient en mouvement, faisant un certain nombre de flexions et d'extensions à une cadence  $n$  par minute. Dans ce but, la soupape respiratoire est maintenue sur un support fixe ; le sujet se place sur une planche massive où sont attachés deux liens, tout près des talons ; les liens s'attachent d'autre part à deux colliers passés autour des cous-de-pied, et limitent la course verticale des jambes (*fig.* 282). Pour ne

(1) Jules Amar (*Journal de Physiol.*, 1911, p. 314).

prendre qu'un exemple parmi plusieurs, un adulte de 65 ki-



FIG. 282. — Piétinement, le corps restant immobile.

logrammes environ consomme :

A chaque *pas* :

2<sup>cc</sup>,250    2<sup>cc</sup>,521    2<sup>cc</sup>,708    2<sup>cc</sup>,911    3<sup>cc</sup>,115 de O<sup>2</sup>,

aux cadences de :

n = 76            85            94            103            113

La dépense est de la forme :

$$d = an + b,$$

$a$  et  $b$  sont deux constantes :  $a = 0^{\text{cm}^3},02$  ;  $b = 0^{\text{cm}^3},83$ .

On calculerait, aux cadences indiquées, les équivalents calorifiques  $0^{\circ},16$  ;  $0^{\circ},178$  ;  $0^{\circ},194$  ;  $0^{\circ},206$  et  $0^{\circ},220$  par pas et par kilogramme. Ainsi le piétinement consomme environ la moitié de la dépense du *pas marché* ordinaire ; et il est d'autant plus onéreux que la cadence est plus rapide et la hauteur de soulèvement des jambes plus grande ; dans le précédent exemple, cette hauteur fut de  $0^{\text{m}},13$ . Il n'en est pas de même dans la marche : le piétinement est contraire aux lois économiques de la locomotion.

308. **Conclusion sur la marche en palier.** — Le résultat obtenu par Taylor dans le transport des fardeaux est un maximum pour l'ouvrier *moyen* : 26 kilomètres de parcours, dont 13 en marchant avec une charge de 42 kilogrammes environ, à la vitesse horaire de 3 kilomètres ; au total, 2.500.000 mètres-kilogrammes par jour, en moyenne, qui représentent (voir tableau § 302) une dépense dynamique de 1.348 grandes calories exactement. Par kilogramme de poids de l'homme et par heure, on aura :

$$\frac{1.348}{75 \times 24} = 0^{\text{Cal}},75$$

à peu de chose près.

C'est le coefficient d'utilisation le plus élevé, pratiquement, des énergies musculaires de l'homme (1). Et ce qui fait l'importance de cette conclusion, c'est qu'elle n'est entachée d'aucun accident touchant l'état physiologique des sujets (Zuntz, Taylor, Amar) ; sans doute le rythme du *pouls* augmente de 30 à 50 0/0 de sa valeur, mais il ne s'ensuit rien d'anormal, à moins que tel ou tel individu ne présente des dispositions aux troubles de fonctionnement du cœur ; la durée

(1) Comme, au repos, la dépense de l'homme est  $1^{\text{Cal}},50$  par kilogramme-heure, on obtient un total de :  $1,50 + 0,75 = 2^{\text{Cal}},25$ .

de la *systole* augmente aussi du  $\frac{1}{3}$  au  $\frac{1}{4}$  de sa valeur, tandis que la *diastole* diminue sa période du  $\frac{1}{3}$  ou même de la moitié; le rapport  $\frac{D}{S}$  tend vers 1,50 (voir § 150).

Le rythme respiratoire s'accélère: au lieu de 16 qu'il affecte dans l'état de repos, il s'élève à 19, 23 et 25 suivant la charge.

La *capacité vitale* s'abaisse en raison d'une charge croissante, mais sans régularité. La température du corps subit des variations très faibles, de  $\frac{1}{4}$  à  $\frac{1}{2}$  degré. Zuntz a noté, enfin, — ce que nous savions par ailleurs (§ 151) — que l'exercice de la marche renforce la puissance musculaire des bras appréciée à l'ergographe de Mosso, et la sensibilité réflexe; l'*equation personnelle* s'atténue légèrement, c'est-à-dire que l'homme réagit plus vite à l'excitation.

Ces conditions de *travail normal*, il n'est possible d'y satisfaire qu'en augmentant la *vitesse* de marche, en ne dépassant pas une charge de 45 kilogrammes, en multipliant les intervalles de repos rendus plus courts. Ceux des ouvriers, *sélectionnés* par Taylor, qui avaient ainsi marché à une vitesse probable de 5 kilomètres, avaient pu charger 58 tonnes par jour, soit un travail total de 3.000.000 de Mkg environ (1).

**309. Marche ascendante.** — Lorsqu'un homme s'élève sur un escalier, le travail de ses muscles est le produit  $P \times h$  de son poids par la hauteur d'ascension.

On peut, en effet, dans une première approximation, négliger la progression horizontale (cas de l'*alpinisme*).

Katzenstein (2), qui fit les premières bonnes mesures de dépense énergétique, obtint 8 petites calories par kilogrammètre. Chauveau (3) montra que la marche ascendante à pleine charge élève le prix du kilogrammètre; la marche à vitesse croissante le diminue (§ 123), et il oscille généralement

(1) Publication de la *Revue de Métallurgie*, p. 330; 1907.

(2) Katzenstein (*Pflüger's Arch.*, t. XLIX, p. 330; 1894).

(3) Chauveau (*Comptes Rendus Sciences*, t. CXXXII, p. 194; 1901).

de 12 à 9 calories; il faut dire aussi que les expériences de Chauveau étaient de trop courte durée.

Zuntz et Schumburg <sup>(1)</sup> obtinrent 7<sup>c</sup>,50 en moyenne, de même que Frentzel et Reach <sup>(2)</sup>. Laulanié mesura, en l'espace de 75 secondes, une dépense variant de 15 calories à 9<sup>c</sup>,6 suivant la charge <sup>(3)</sup>.

Les expériences des auteurs cités ou ne portaient que sur des charges de 10 à 30 kilogrammes, ou ne concernaient que des vitesses de 0<sup>m</sup>,04 à 0<sup>m</sup>,07, ou, enfin, ne duraient que quelques minutes (Chauveau, Laulanié, par exemple).

Nous avons donc cherché les conditions d'un travail continu : « Des hommes montent et descendent un escalier dont les marches n'ont guère plus de 0<sup>m</sup>,16 de haut; la pente en est très dure. Quant à la charge, elle a varié de 40 à 60 kilogrammes : c'est un sac rempli de lentilles ou de haricots que les hommes portent sur l'épaule, ou appuyé sur la nuque. La vitesse de déplacement *était laissée à leur discrétion*; mais, une fois adoptée, je veillais à ce qu'elle fût respectée jusqu'à la fin du travail; les repos furent de deux à trois minutes <sup>(4)</sup>. » En moyenne, on observa une vitesse de 0<sup>m</sup>,07 à 0<sup>m</sup>,10 par seconde; le travail durait de une à cinq heures, et nos sujets, bons ouvriers, robustes et entraînés, étaient âgés de vingt à quarante ans et faisaient de leur mieux.

Seulement, à chaque voyage, il faut descendre l'escalier après l'avoir monté; comme, dans ce cas, la dépense énergétique vaut les  $\frac{152}{100}$  d'une ascension simple (§ 147), nous utiliserons cette convention, d'ailleurs justifiée, pour calculer la dépense du travail de montée: ce sera les  $\frac{100}{152}$  de celle qui concerne un voyage complet et mesurée directement.

Le tableau suivant rassemble nos observations:

(1) Zuntz et Schumburg, *Physiol. des Marsches*, p. 277; 1901.

(2) Frentzel et Reach (*Pflüger's Arch.*, t. LXXXIII, p. 441; 1901).

(3) Laulanié, *Traité de Physiol.*, p. 792; 1905.

(4) Jules Amar, *le Rendement...*, p. 68-71.

| HOMME + CHARGE                | HAUTEUR<br>A MONTER | TOTAL<br>des<br>VOYAGES | TEMPS<br>EFFECTIF               | COUT<br>du<br>kilogram-<br>mètre |
|-------------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 80,2 + 45 kg.                 | 4 <sup>m</sup> ,25  | 128                     | 4 <sup>h</sup> ,00 <sup>m</sup> | 5 <sup>c</sup> ,00               |
| 74,5 + 45                     | 4,25                | 134                     | 4,30                            | 5,20                             |
| 74,5 + 40                     | 4,80                | 46                      | 1,00                            | 5,70                             |
| 71,3 + 45                     | 4,25                | 141                     | 5,00                            | 6,10                             |
| 56,6 + 40                     | 4,80                | 45                      | 1,00                            | 6,60                             |
| 67,7 + 50                     | 3,78                | 158                     | 4,00                            | 8,30                             |
| 70,5 + 50                     | 3,78                | 124                     | 4,30                            | 8,40                             |
| 61,3 + 40                     | 3,78                | 52                      | 1,25                            | 9,50                             |
| 60,4 + 50                     | 4,80                | 112                     | 4,00                            | 9,50                             |
| 69,2 + 50                     | 3,78                | 50                      | 1,30                            | 9,60                             |
| 68,0 + 50                     | 4,80                | 100                     | 3,00                            | 10,20                            |
| 62,7 + 50                     | 3,78                | 105                     | 3,30                            | 10,30                            |
| 62,3 + 50                     | 3,78                | 120                     | 4,00                            | 10,30                            |
| Coût moyen du kilogrammètre : |                     |                         |                                 | 8 <sup>c</sup> ,05.              |

On voit, d'après ces expériences, que le coût du kilogrammètre peut varier du simple au double, étant, en moyenne, de 8 petites calories environ. Pour nous rendre compte de ces variations, calculons le travail total de chaque sujet (le travail résistant étant les  $\frac{52}{100}$  du travail moteur), et la vitesse par seconde, et portons-les en regard de la dépense. Le graphique (*fig. 283*) montre — à de très rares exceptions près — que la dépense diminue quand la quantité de travail ou la vitesse augmentent ; l'accroissement de charge a un effet anti-économique, comme il résulte du tableau. Enfin, s'agissant d'hommes qui choisissaient eux-mêmes leur vitesse de marche, les différences constatées impliquent un coefficient d'entraînement personnel ; on pouvait voir, du reste, que tel ouvrier chargeait son fardeau d'une manière défectueuse, ou le balançait, lui imprimait de temps en temps une secousse pour en rétablir l'équilibre.

Si, maintenant, nous remarquons que la meilleure production fut de 31.716 kilogrammètres par heure, à la vitesse de 0<sup>m</sup>,12, en employant un homme de 57 kilogrammes à peine sous une charge de 40 kilogrammes, nous en con-

clurons que le travail maximum, par journée de huit heures, sera :

$$31.716 \times 8 = 253.728 \text{ kilogrammètres.}$$

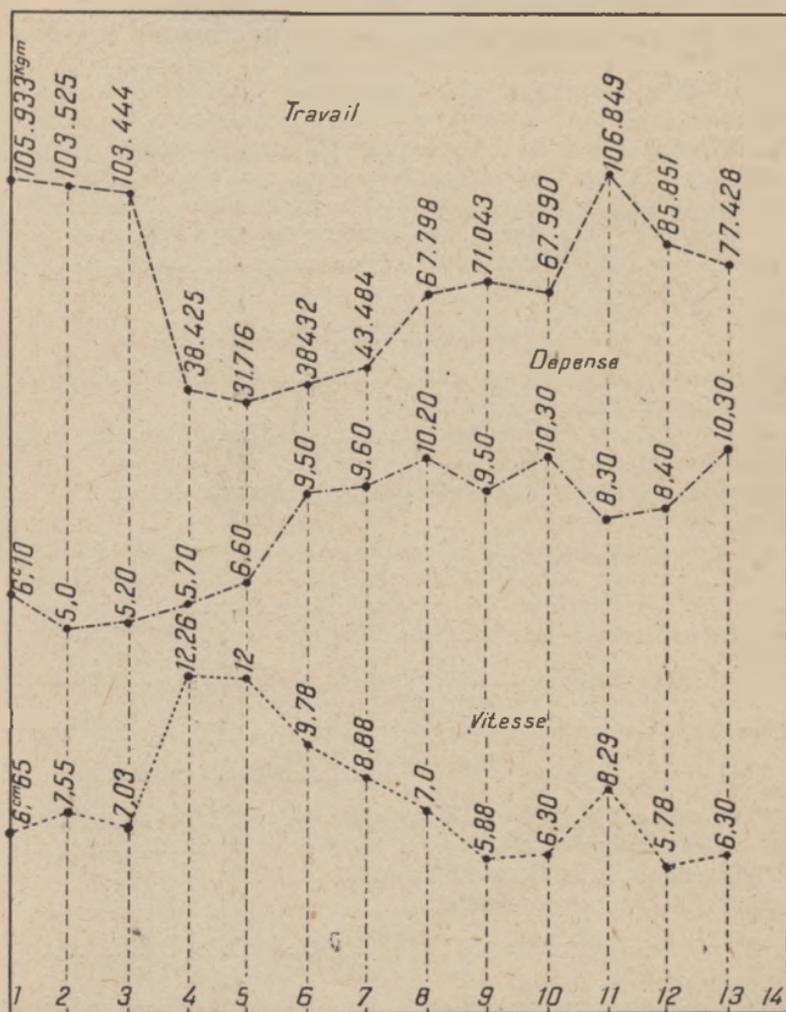


Fig. 283. — Variations de la dépense par kilogrammètre, suivant la vitesse et la quantité de travail.

Dans les conditions les plus favorables, on pourra donc effectuer un travail journalier de 250.000 kilogrammètres environ, soit une dépense dynamique de :

$$250.000 \times 0^{\text{Cal}},008 = 2.000 \text{ grandes Calories,}$$

Toutefois, l'expérience nous a montré qu'il convient de ne jamais dépasser 200.000 kilogrammètres par jour, quand l'homme transporte des fardeaux lourds (50 à 60 Kg).

**310. Observations anciennes.** — Les observations de Borda au Pic de Tenériffe, de Coulomb, de Hachette, de Navier, n'ont plus qu'un intérêt historique. Celle de Coignet<sup>(1)</sup> mérite d'être retenue : en dirigeant les travaux de terrassements de Vincennes, cet officier imagina de faire monter les manœuvres au moyen d'échelles et de les faire descendre par un système de plateaux à contrepoids, chargés d'un côté d'une brouette pleine. Il nota ainsi 310 ascensions par jour à une hauteur de 13 mètres, et à la vitesse de 0<sup>m</sup>,18. Il évalua le travail journalier maximum, pour un ouvrier de 70 kilogrammes, à :

$$70 \times 310 \times 13 = 282.100 \text{ kilogrammètres.}$$

Par son système, il réussit à enlever 53.000 mètres cubes de terre avec une économie de 75 0/0.

Les conditions étaient favorables : grande vitesse et faible charge (le poids utile étant nul).

Et voici des observations inédites, faites par nous en 1910 et 1911.

1° Un coltineur, pesant 85 kilogrammes, âgé de quarante-cinq ans, monte 7 sacs de bois de 50 kilogrammes chacun, à une hauteur de 12<sup>m</sup>,71 (quatre étages); sa vitesse est 0<sup>m</sup>,17; il fait 12 voyages semblables dans sa journée. On a :

$$\mathcal{C} = \begin{cases} (50 + 85) 12,71 \times 12 \times 7 = 144.131 \text{ kgm. pour l'ascension} \\ 85 \times 12,71 \times 7 \times 12 \times \frac{52}{100} = 47.189 \quad \text{— la descente} \end{cases}$$


---

491.320 kgm. en tout

2° En une seule après-midi, un autre ouvrier porta au septième étage de la Cour de cassation, à 22 mètres de haut, 36 sacs de 50 kilogrammes; sa vitesse fut de 0<sup>m</sup>,12.

D'où :

$$\mathcal{C} = (70 + 50) \times 22 \times 36 \times \frac{152}{100} = 144.461 \text{ kilogrammètres.}$$

En y ajoutant trois livraisons dans la matinée, équivalant à 42.126 kilogrammètres, et une marche de 1<sup>h</sup>m,500 à peu près, le total atteint 200.000 kilogrammètres.

**311. Plan incliné.** — La marche sur plan incliné a été peu étudiée; c'est pourtant un sujet des plus intéressants

(1) C<sup>o</sup> Coignet (*Mémorial de l'officier de Génie*, n<sup>o</sup> 12, p. 285; 1835).

au point de vue professionnel : A quelle hauteur un homme peut-il s'élever en un jour ? Quel est l'effet de la charge ? Quels sont ceux de la vitesse et de l'inclinaison du sol ?

Zuntz et Schumburg (1) ont considéré des plans inclinés de  $0^{\circ} 6' 30''$  (soit  $1^{\text{mm}},8909$  par mètre) et de  $3^{\circ} 44' 15''$  (soit  $65^{\text{mm}},186$  par mètre parcouru); mais leur méthode constitue un cercle vicieux, attendu qu'ils admettent que la marche sur plan incliné équivaut à la marche en palier augmentée de l'ascension qui correspond à la pente. Toutefois ce principe (mécanique, mais non physiologique) se vérifia suffisamment dans leurs expériences.

La dépense d'énergie dans les *retours* (descente sur un plan incliné) ne fut pas mesurée.

D'ailleurs de pareilles expériences sont difficiles à entreprendre : elles nécessitent une installation spéciale, par exemple un *tapis roulant*, ou, plus modestement, la construction d'un plan incliné robuste, mais démontable, qui ait une longueur de 200 mètres environ, et dont on puisse modifier la pente.

Nous avons (2) construit un plan de 12 mètres à peine et varié son inclinaison de 8 à 13 centimètres par mètre de parcours, afin d'étudier l'effet des fortes rampes.

Le sujet marche à une même allure, tantôt sur le sol horizontal, tantôt sur le plan ; nous mesurons la consommation d'oxygène par montée, puis par descente. La vitesse est de  $3^{\text{km}},700$  à l'heure, au rythme de 100 pas ; l'homme pèse 66 kilogrammes ; la seule charge étudiée est un havresac de  $7^{\text{kg}},300$  (fig. 284). On a trouvé les résultats suivants :

(1) Zuntz et Schumburg, *Physiol. des Marsches*, p. 238 et suiv. ; 1901. Dans (*Zeitsch. Biochem.* de juillet 1914, vol. 65, n° 1), Brezina et Reichel étudient la *marche en montagne*.

(2) Jules Amar (*Comptes Rendus Acad. Sc.*, 25 mai 1914, p. 1327). Il est intéressant de noter que, depuis, la technique avec escalier roulant fut employée aux Etats-Unis, et qu'elle ne fit que confirmer les conclusions que nous formulons plus loin (*Benedict et Murchhauser, Energy transformations during horizontal Walking*; Public. n° 231. Washington, 1915 ; — H. Monmouth Smith, *Gaseous Exchange... for Grade Walking*; Public, n° 309; Washington, 1922).

| PENTE<br>du<br>PLAN | HOMME<br>+ CHARGE  | COUT DU METRE-KILOGRAMME   |                            |                            |
|---------------------|--------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|                     |                    | ASCENSION                  | DESCENTE                   | PALIER                     |
| 0 <sup>m</sup> ,08  | 66 kg.<br>66 + 7,3 | 1 <sup>c</sup> ,00<br>1,50 | 0 <sup>c</sup> ,85<br>1,43 | 0 <sup>c</sup> ,41<br>0,49 |
| 0 <sup>m</sup> ,13  | 66 kg.<br>66 + 7,3 | 1,80<br>2,20               | 1,00<br>0,84               | »<br>»                     |

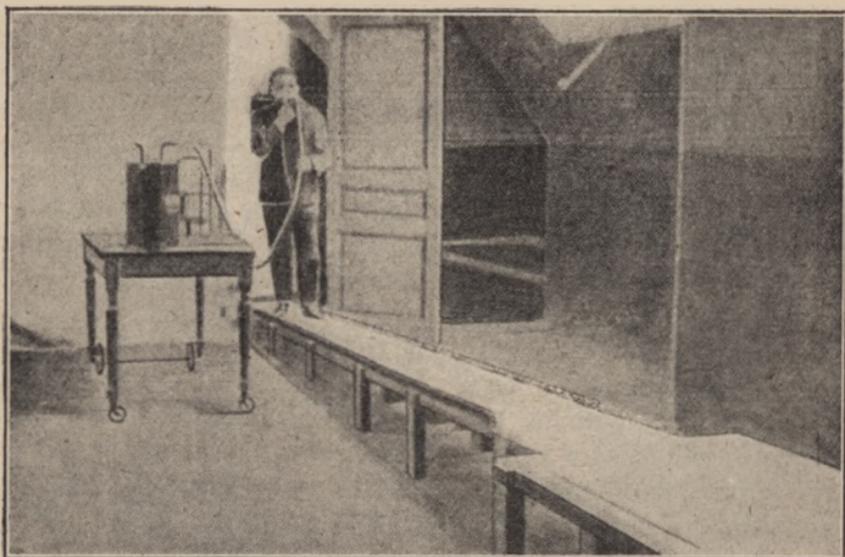


FIG. 284. — Marche sur plan incliné (Jules Amar).

On voit que, dans l'ascension, la dépense augmente proportionnellement à la pente, pour une charge donnée. Retrançons le prix du mètre-kilogramme en palier des valeurs trouvées ; nous aurons :

$$1^{\text{c}},00 - 0,41 = 0^{\text{c}},59 \quad \text{et} \quad 1^{\text{c}},80 - 0^{\text{c}},41 = 1^{\text{c}},39.$$

Il s'ensuit que l'élévation de 1 kilogramme à 8 centimètres, ou un travail de  $0^{\text{kgm}},08$  coûte  $0^{\text{c}},59$ , soit  $7^{\text{c}},40$  environ par kilogrammètre dans un cas, et  $\frac{1,39}{0,13} = 10^{\text{c}},69$  dans le second cas. Il est clair que la dépense d'énergie relative à des pentes de 8 à 13 centimètres s'écarte de la valeur addi-

tive : palier + ascension ; c'est ce que nous avons donné à entendre d'après la théorie (§ 291).

La descente est encore un phénomène complexe ; la dépense d'énergie augmente un peu avec la déclivité du terrain ; elle s'accroît avec la charge pour une pente de 8 centimètres, elle diminue pour une pente de 13 centimètres (!). Calculons la valeur de la descente verticale :

Dans un cas, on a :

$$\frac{0,85 - 0,41}{0,08} = 5^c,50 \text{ par kilogrammètre résistant ;}$$

Dans l'autre :

$$\frac{1,00 - 0,41}{0,13} = 4^c,53 \text{ par kilogrammètre résistant.}$$

Et si on fait la même opération pour l'homme chargé, la diminution est plus accentuée. Il s'agit donc là d'une marche économique, d'une forme de locomotion assez obscure (§ 293) qui appelle une étude détaillée. Pour le moment, il paraît indiqué de transporter les fardeaux *en descendant* sur plan incliné et d'effectuer les montées à vide ; et dans ces conditions d'adopter une pente assez forte, voisine de 13 centimètres. En appelant  $L$  le parcours en palier,  $i$  la pente en mètres, on peut calculer approximativement la valeur  $L'$  du parcours sur terrain incliné. On aura :

Sur rampes :

$$L' = \frac{L}{1 + 16i}$$

Sur déclivités :

$$L' = \frac{L}{1 + 10i}$$

**312. Marche descendante.** — Nous rappellerons qu'un ensemble d'expériences très concordantes a permis à Chauveau d'établir que la dépense d'énergie est plus faible pour le travail résistant (descendant) que pour le travail moteur (ascendant) ; le rapport est exactement de 52 à 100, aux vitesses ordinaires (voir § 147). Et nous venons de voir, dans le cas du plan incliné, que ce rapport est de  $\frac{85}{100}$  pour l'homme descendant à vide sur une pente de 8 centimètres ; il diminue encore pour l'homme chargé, soit  $\frac{75}{100}$ . Si la pente atteint

13 centimètres, le rapport est à peu près celui de Chauveau, comme si on descendait verticalement ; mais, en charge, il diminue très nettement jusqu'à n'être plus que de  $\frac{38}{100}$ .

**313. Comparaison de la marche verticale et de la marche horizontale.** — Nous avons trouvé que, généralement, la dépense par kilogramme et par mètre horizontal est de  $0^{\circ},51$  ; par kilogrammètre dans une ascension d'escalier, elle est de 8 calories en moyenne ; d'où un rapport entre le kilogrammètre et le mètre-kilogramme égal à  $\frac{8}{0,51} = 16$  environ.

Pourtant un homme a pu faire *une même dépense totale d'énergie par jour* en effectuant 2.220.738 mètres-kilogrammes de marche horizontale, ou 69.027 kilogrammètres, en s'élevant sur un escalier et redescendant après chaque ascension (1). Les  $\frac{152}{100}$  de 69.022 équivalent donc à 2.220.738 mètres-kilogrammes. On trouve ainsi un rapport de 20; le sujet n'adoptait ni les mêmes périodes de travail et de repos, ni la même vitesse ; il portait une charge de 45 kilogrammes.

Coulomb, comparant le parcours journalier maximum d'un homme et le nombre d'ascensions qu'il peut faire, calcule un rapport de 18 ; et Haughton (2), qui fit tant de curieuses recherches de mécanique humaine, adopta le coefficient 20.

Dans la grande généralité des cas, on doit prendre le rapport 16 à 1 comme le plus près de la vérité, sans oublier que les circonstances de l'activité musculaire le modifient, ce sera le *rapport de Coulomb*.

A cet égard, un homme de 65 kilogrammes fait 65 mètres-kilogrammes par mètre, ou  $\frac{65}{16} = 4$  kilogrammètres ; il s'ensuit qu'un pas de  $0^m,80$  équivaut à un travail de  $4 \times 0,8 = 3^{\text{kgm}},20$ , valeur bien plus faible que celle déduite des mesures graphiques (§ 285). On calculerait, par ce procédé, un rendement net de 32 0/0 dans la marche ordinaire.

(1) Jules Amar, *le Rendement...*, p. 74.

(2) Haughton (S.), *Principles of animal mechanics*, 1873.

## CHAPITRE III

### LE TRAVAIL PROFESSIONNEL ; L'OUTILLAGE

#### 314. Action de l'homme sur des outils : l'apprentissage.

— Les résultats exposés précédemment n'offraient pas une grande complexité : il s'agissait de graduer l'effort et la vitesse du moteur et de surveiller quelques attitudes vicieuses du corps. Ces facteurs du travail sont, relativement, faciles à isoler et à étudier ; ils ne sont pas nombreux.

Dans l'action de l'homme sur les outils, les attitudes défectueuses se multiplient ; raideur ou gaucherie de l'apprenti, position du corps par rapport à l'installation, prise de l'outil, oscillations du buste non commandées par la nature du travail, absence de régularité dans les mouvements des membres, gradation à observer dans l'effort, vitesse à adopter, rythme et intervalles de repos. Si l'on y ajoute les dispositions propres de l'ouvrier, sa taille, sa force, son degré d'éducation au sens complet de ce mot, on aura défini à peu près toutes les *variables* que nous qualifierons de *physiologiques*.

Mais il y a aussi l'*outillage* qui, par son mode d'organisation, sa qualité, sa sélection, retentit fortement sur la production de l'homme (voir § 200). Il fournit, par conséquent, un certain nombre d'éléments utiles à bien examiner qui seront les *variables mécaniques*.

L'étude de la totalité des variables mécaniques et physiologiques constitue la science de l'*apprentissage*, œuvre des laboratoires, mais de laboratoires ayant un contact permanent avec l'industrie. Pour que l'homme, avec toutes ses qualités physiques et morales, avec sa puissance musculaire et intellectuelle, produise son maximum d'effet, il est nécessaire de lui fournir toutes les *conditions internes et externes* (voir livre IV) sans lesquelles ce maximum ne serait jamais

atteint. En particulier, le *mouvement de l'homme et de l'outil* exigent des soins attentifs ; il y a des économies de temps et d'efforts à réaliser. L'exemple du transport de fardeaux, étudié mûrement par Taylor, est instructif à cet égard ; il révèle l'influence d'une charge et d'une vitesse convenables sur le rendement de l'ouvrier ; mais cet exemple offre, en quelque sorte, un type simplifié. En travaillant *au tour*, si l'on veut, il sera nécessaire d'avoir égard aux efforts de l'ouvrier, à ses mouvements propres, pour qu'il n'en dépense pas d'inutiles ; à sa vitesse, au choix de ses outils, pour que, à fatigue égale, il accroisse la quantité d'ouvrage effectué ; aux intervalles de repos, à leur répartition sur la journée active et par rapport aux heures de repas. Parce qu'il y a une science du travail, il y a aussi un art de travailler, art prodigieusement fécond en bienfaits économiques, et sur lequel Taylor a puissamment retenu l'attention du monde industriel, des employeurs et des employés. Mais le travail humain ne doit tendre au maximum qu'à la condition d'assurer à l'ouvrier un maximum de bien-être.

315. Arrêtons-nous sur le côté technique de ces méthodes nouvelles ; il s'agit, en définitive, de soumettre le *mouvement*, celui du moteur humain, celui des machines, aux lois d'une *dépense économique pour un travail maximum*. On sait que les mouvements rapides répondent à ce but, et qu'en devenant *automatiques*, ils gagnent en vitesse et en précision ; mais il est des *habitudes* à combattre, au même titre que les mouvements superflus. De tous les mouvements on ne doit retenir que ceux dont l'efficacité n'est pas douteuse. « La science d'organisation de l'avenir, écrit Gilbreth (1), demande que les métiers soient enseignés suivant des mouvements types établis par un bureau. » Taylor s'exprime en des termes plus saisissants : « On voit les forêts disparaître, les forces hydrauliques gaspillées, le sol emporté à la mer par les inondations ; l'épuisement des gisements de charbon et de fer est proche. Mais le gaspillage

(1) F. Gilbreth, *Motion Study*, p. 98 ; 1914 ; — *Idem* et M<sup>me</sup> Gilbreth, *Motion study for the Handicapped* ; London, 1920.

journalier de l'effort humain par maladresse, par mauvaise direction ou incapacité et que M. Roosevelt considère comme une perte de rendement national, est moins visible, moins tangible et moins nettement appréciable. On se rend compte facilement des gaspillages de matériel; on apprécie plus difficilement celui qui résulte de l'incapacité et de la maladresse des hommes (1). »

Dans une évaluation moyenne, le travail inutile gaspille le tiers des énergies humaines disponibles; autant dire que par une organisation méthodique on accroîtra de  $\frac{1}{3}$  la production industrielle, comme s'il y avait un accroissement égal de la main-d'œuvre; on pourra augmenter les salaires dans une proportion à déterminer et contribuer à la paix sociale.

L'analyse des mouvements, leur classement par ordre d'utilité, la vitesse à leur donner, leur combinaison, demandent une compétence toute spéciale; c'est un problème de *cinématique*. Les procédés *graphiques* et *chronophotographiques* permettent de trouver la trajectoire d'un corps mobile et la loi qui relie l'espace parcouru au temps et à la vitesse, ou au temps et à l'accélération. Ayant relevé ainsi, dans le travail d'un bon ouvrier, habile, entraîné, les éléments de chacun de ses mouvements, on pourra éliminer tous ceux que les autres ouvriers font inutilement, et recomposer pour ces derniers les mouvements utiles seuls; on pourra les leur enseigner par la vue des synthèses *cinématographiques* ou, mieux des *chronocyclogrammes* de Gilbreth (§ 7); pour eux, on fera coopérer la science et l'expérience, les calculs et les faits; pour eux, on formera des instructeurs qui combattront la *routine* avec tact et sagacité, qui se rendront sympathiques par leur savoir et leur savoir-faire, qui leur montreront et expliqueront les avantages d'une direction scientifique dans le travail; pour eux, on chargera des expérimentateurs de faire le tri, puis la synthèse des mouvements efficaces dans chaque genre de travail, et d'en fournir une *carte de renseignements*; ce sera pour les ouvriers, apprentis et anciens, que l'homme de laboratoire, enfin, quittera sa « tour d'ivoire » et portera sur le terrain de l'in-

(1) F. Taylor, *Organis. scient. des usines* (loc. cit., p. 2).

dustrie, à l'atelier, à l'usine, le merveilleux outillage dont il connaît les secrets, outillage insoupçonné des premiers observateurs, pour qui la machine humaine avait des rouages mystérieux, une disposition et un fonctionnement à jamais soustraits aux lois de la mécanique.

316. **Aperçu historique sur le travail professionnel.** — L'étude scientifique du travail professionnel remonte à vingt-cinq ou trente ans à peine. L'antiquité n'assignait aucune loi à la main-d'œuvre hors celle de l'*esclavage* pour élever *pyramides* ou *temples* ; elle était cruelle.

Pour que la mécanique en vint à s'occuper de l'homme, « moteur primaire », il fallait qu'elle se constituât en science des machines. Ce fut l'œuvre de Galilée (1564-1642). Cet observateur de génie réussit à établir les principes des machines simples (levier, plan incliné, etc.), et ceux de la résistance des matériaux ; il en fit, par curiosité, l'application aux êtres animés. Frappe notamment du phénomène de la *fatigue*, il crut en trouver l'explication dans ce fait que les corps graves ont tendance à se mouvoir vers le bas et non point vers le haut. Une ascension d'escalier est donc contraire aux lois naturelles et entraîne la fatigue. Mais pourquoi celle-ci apparaît-elle même dans la descente prolongée d'un escalier ? Galilée change alors son explication et admet que les muscles se fatiguent parce qu'ils n'ont pas que leur *seul poids* à mouvoir, parce qu'avec cela ils doivent déplacer le poids du squelette, de tout le corps quelquefois : c'est le cas des jambes. Le cœur, par contre, est *infatigable*, parce qu'il ne meut que sa propre masse (!).

A la fin du xvii<sup>e</sup> siècle, d'illustres physiciens et géomètres, Sauveur, Philippe de la Hire, Amontons, Vauban, développèrent des considérations sur la mécanique humaine. De la Hire montra expérimentalement que le *poids* de l'ouvrier est une condition de sa *force physique*, et intervient utilement pour lui permettre de déplacer de lourds fardeaux, par exemple au moyen d'une poulie. Ces fardeaux auraient pour limite supérieure environ 65 kilogrammes. Il reconnut, d'autre part, que pour tirer sur une corde de *bas en haut*, l'homme a plus de force debout qu'assis. Enfin, il indiqua cette autre limite de 75 kilogrammes pour l'homme qui charge un fardeau sur ses épaules et marche lentement sur un terrain plat ; et il conclut que c'est en montant sur un plan incliné, sur une hauteur, que l'on fait le meilleur usage de ses forces. En conséquence,

(1) Galilée (*Opere*, édition de Milan, vol. XI, p. 558 ; 1811). — Il convient de noter, antérieurement à Galilée, les remarquables observations de Leonard de Vinci (1452-1519) dans son *Trattato della Pittura* (Milano, 1804, p. 121 et suiv.), et relatives aux attitudes et au mouvement du corps humain.

il déconseille d'employer l'ouvrier à développer des efforts de traction <sup>(1)</sup>.

Amontons s'intéressa spécialement à l'évaluation de la puissance, en faisant exécuter des travaux rapides dans un temps très court « et jusqu'à perdre haleine » <sup>(2)</sup>, et il fournit quelques indications sur la quantité journalière de travail, ainsi que nous le verrons bientôt.

Quant à Vauban (1633-1707), il formula de véritables règles pour organiser le travail, éviter les incapables et les paresseux, en recommandant de ne jamais prendre l'ouvrier que payé à la tâche, mais bien payé et bien nourri <sup>(3)</sup>.

Il importe de noter que si la plupart des recherches concernaient l'évaluation de la force, élément statique, la notion de travail n'en était pas moins dans les esprits; les savants que nous venons de citer savaient fort bien que l'effort produit pour vaincre une résistance et la déplacer « correspond à un poids soulevé à une certaine hauteur ».

Le XVIII<sup>e</sup> siècle, grâce surtout aux études d'hydraulique, s'occupa du travail ou, comme on disait alors, « de la quantité d'action » fournie par l'activité musculaire. Ce fut l'époque des Bernoulli, des Bouguer, des Deparcieux, des Euler, des Schultze, dont il a été question au sujet du travail maximum (§ 129). En 1785, le grand physicien français Coulomb (1736-1806) communiqua à l'Institut ses admirables recherches sur « la force des hommes »; elles ne furent publiées dans les *Mémoires de l'Institut* que les premiers jours de ventôse an VII (1799). Il s'était proposé d'évaluer la quantité d'action (le travail) dans différentes professions, choisies parmi les plus pénibles, et telles que l'homme y atteigne un degré de fatigue qu'il serait dangereux de dépasser. Les résultats de Coulomb seront discutés plus loin <sup>(4)</sup>.

Lazare Carnot <sup>(5)</sup>, à la même date, et sans expériences d'ailleurs, se ralliait aux idées générales de Coulomb, et l'on peut dire que jusqu'en 1858 environ, le point de vue physique domina exclusivement les recherches, malgré la naissance de l'Energétique. En se basant sur le *degré de fatigue*, tous ces savants firent, néanmoins, œuvre utile : ils évaluèrent, assez exactement, la production de travail de l'homme se livrant à son activité normale. Mais seuls

(1) De la Hire (*Hist. Acad. Roy. des sciences*, de 1666 à 1686, p. 70; *Mémoires Acad. Roy. des sciences*, 1699, p. 155, et 1702, p. 95).

(2) Amontons (*Mémoires Acad. Roy. Sciences*, 1699, p. 112, et 1703, p. 100).

(3) Vauban, le *Directeur des Fortifications*, reproduit dans les *Oisivetés*, tome I, Paris, 1910.

(4) Coulomb (voir sa *Théorie des Machines*, édit. Bachelier, 1824).

(5) Lazare Carnot, *Essai sur les machines en général*, 1786.

Coulomb, et déjà Bouguer <sup>(1)</sup> et S'Gravesande <sup>(2)</sup>, avaient signalé l'importance de la *vitesse* du travail sur la production journalière. Les autres n'eurent aucunement égard à ce facteur.

Au XIX<sup>e</sup> siècle, les mécaniciens purs perdirent du terrain. Les Navier <sup>(3)</sup>, les Coriolis, les Dupin, les Poncelet, qui firent tant pour les machines de l'industrie, faute d'une technique appropriée, ne réussirent pas à creuser le problème des *moteurs animés*. Et pourtant, plus que jamais, ils sentaient l'importance des solutions, et comprenaient leur richesse d'applications <sup>(4)</sup>. Tandis que Dupin consacrait à cette matière son cours du Conservatoire, Poncelet en faisait l'objet de sien à Metz. L'enthousiasme fut vite épuisé, car il n'y avait vraiment pas de quoi l'alimenter.

Depuis 1835, avec Hirn, trente-cinq ans après, grâce à Chauveau, l'énergétique vint fournir la méthode d'évaluation de l'énergie. Il ne nous est pas permis d'omettre que l'idée d'évaluer le travail produit en utilisant la quantité d'oxygène consommé fut émise et, pour la première fois, appliquée par Lavoisier. Ayant effectué des mesures sur son collaborateur Seguin, il conclut : « Ce genre d'observations conduit à comparer des emplois de forces entre lesquelles il semblerait n'exister aucun rapport. On peut connaître, par exemple, à combien de livres en poids répondent les efforts d'un homme qui récite un discours, d'un musicien qui joue d'un instrument. On pourrait même évaluer ce qu'il y a de mécanique dans le travail du philosophe qui réfléchit, de l'homme de lettres qui écrit, du musicien qui compose. Ces effets, considérés comme purement moraux, ont quelque chose de physique et de matériel qui permet, sous ce rapport, de les comparer avec ceux que fait l'homme de peine. Ce n'est donc pas sans quelque justesse que la langue française a confondu, sous la dénomination commune de *travail*, les efforts de l'esprit comme ceux du corps, le travail du cabinet et le travail du mercenaire <sup>(5)</sup>. »

Cette belle doctrine n'eut son plein épanouissement, en France, que dans l'œuvre magistrale de Chauveau, et en Amérique dans celle de l'école d'Atwater. Mais en Italie, Mosso et Tréves, en Allemagne Zuntz <sup>(6)</sup>, du Bois-Reymond, A. Læwy, et leurs nombreux élèves, eurent bientôt fait d'accumuler des faits dont la science du travail professionnel a fait son profit. D'autre part, Marey <sup>(7)</sup> et ses continuateurs employèrent toutes les ressources de la méthode

(1) P. Bouguer, *Traité du Navire*, p. 109; 1746.

(2) S'Gravesande, *Physices Elem. Math.*, I, n° 1856.

(3) Navier, *Architecture hydr.* de Bélidor, 1819, notes, p. 382.

(4) Voir notamment la leçon d'inauguration de Ch. Dupin au Conservatoire national des Arts et Metiers (Discours du 25 janvier 1829).

(5) Lavoisier, *Œuvres complètes*, II, p. 688 (édition officielle).

(6) Zuntz et Schumburg, *Studien zu einer Physiol. des Marsches*, Berlin, 1904.

(7) Marey, *la Méthode graphique*, 1878; *le Mouvement*, 1894.

graphique pour enregistrer l'effort musculaire dans toutes les directions. Braune et Fischer, Démeny s'attachèrent aux faits de la locomotion ; Imbert, Amar, aux travaux professionnels. Le *degré de fatigue* est, désormais, apprécié d'après la dépense d'énergie, statique et dynamique, et se trouve lié aux éléments du travail qui sont : effort, vitesse, rythme, durée. S'il s'agit d'un exercice de force avec production considérable de travail mécanique, cette production se déduit de la mesure de la dépense d'énergie grâce au rendement net des muscles : 0,30 dans le cas où les muscles des jambes sont actifs, 0,25 en moyenne dans le cas des muscles des bras, et pour une activité continue et normale.

317. Il faut citer à part *Frédéric Taylor* (1) et ses disciples Gantt, Frank Gilbreth (2), B. S. Thompson, pour l'étude du travail professionnel à l'atelier même et à l'usine. Leur méthode repose essentiellement sur le *chronométrage des mouvements*, afin de connaître la vitesse *optimum*, et sur une sélection judicieuse des mouvements utiles, nécessaires au travail, qui entraîne la suppression de tous ceux qui paraissent inutiles. La durée des mouvements utiles, déterminée sur un ouvrier d'élite, permet d'évaluer le rendement idéal d'une usine. Dans la réalité, l'ouvrier se rapproche de ce rendement, à partir d'un minimum de production, et il trouve le moyen d'accroître son salaire en tendant de plus en plus vers la limite du maximum. L'œuvre admirable de ces ingénieurs a été révélée en France par M. Henry le Chatelier, qui fit traduire et préfaca l'ouvrage de Taylor ; un succès mêlé d'étonnement et de curiosité fut fait à cette publication. On avait oublié que Vauban, Coulomb et surtout Prony (1755-1839) que cite Babbage (§ 200), s'étaient appliqués déjà aux méthodes d'organisation et de *division du travail*. Et lorsque, parcourant les pages de notre *Traité*, le lecteur verra quelle part insoupçonnée revient à nos savants dans cette révolution économique, il éprouvera quelque regret des retards et des hésitations, de l'indifférence auxquels se heurtent souvent les idées françaises. Car ces idées traduisent plus fidèlement que celles de Taylor la préoccupation dominante de la science : celle de ne pas franchir les limites physiologiques de l'activité humaine. Mais elles n'avaient pas ce caractère pratique ou l'industrie aurait pu voir d'utiles applications. Le savant américain, au contraire, avait cet instinct puissant de la vie des usines et des ateliers ; il s'était

(1) Frederick Winslow Taylor, *Principes d'organisation scientifique des usines*, trad. Jean Royer, préface de H. Le Chatelier ; Paris, Dunod et Pinat, 1912.

(2) Frank Gilbreth, *Motion Study*, 1911 ; — *Motion Study for the Handicapped*, London, 1920 (en collab. avec Lady Gilbreth) ; — Gantt, *Practical Application of scientific Management (Engineering Magaz., vol. 41, p. 1)*.

formé à l'école des ouvriers et connaissait ainsi leur *lenteur systématique*, comme leurs qualités. Il s'efforça donc de remédier à l'une et de faire valoir les autres. Pour introduire le système du travail rapide, il analysa tous les éléments du travail. Par exemple, dans la manutention des gueuses de fonte (§ 305), il distingue : « L'enlèvement de la gueuse du sol ou du tas, la marche avec la charge, en palier ou en rampe, la projection de la gueuse à terre ou le dépôt de cette gueuse sur un tas, le retour sans charge ». Ces éléments sont chronométrés sur de très bons ouvriers, des *étalons*. Et comme ces conditions de travail maximum lui ont appris qu'un ouvrier sur cinq à peine pouvait les réaliser, il établit le principe de la *Selection* des travailleurs. Les caractéristiques du système de Taylor, sur lesquelles nous reviendrons, sont précisément le chronométrage et la sélection.

Mais ce serait une erreur de n'y voir que cela, ainsi qu'on l'a fait souvent. Au contraire, Taylor insiste sur la partie *psychologique* et *administrative* de sa méthode; il s'est efforcé d'organiser les services de bureaux en même temps que les ateliers.

Lorsque Fayol, en France, préconise des règles administratives dont on a fait le *Fayolisme*, il se conforme aux idées de Taylor. Et nous-même n'avons jamais séparé le progrès de cette branche de l'organisation du progrès général de l'industrie. Mais c'est le travail proprement dit, mécanique, physiologique, psychologique, qui appelle des recherches plus qu'on ne croit généralement. Et c'est par lui, dans une certaine mesure, que Taylor dut commencer.

Frédéric Winslow Taylor est né en 1856 à Germann Town Pa, et mort à Philadelphie le 21 mars 1915, avant d'avoir épuisé toute son activité scientifique si originale.

Il avait été tour à tour apprenti, ouvrier, contremaître, ingénieur en chef aux usines de Midwale, à la Bethlehem. Entouré de bons collaborateurs, il put réaliser ses idées et systématiser ses observations. Il débuta à la Midwale en 1878, une affection des yeux ayant interrompu ses études. Mais bientôt sa méthode se heurta au parti-pris et à la routine. Les économistes lui préférèrent évidemment leurs propres théories. Socialistes et syndicalistes en redoutèrent, non sans quelque raison, « l'organisation du surmenage ».

John Edwards, tout en reconnaissant que le Taylorisme éduque l'ouvrier, exerce l'intelligence et l'habileté des chefs, lui reprocha ses complications. Mais, à juste titre, Schuchart contesta ce grief, et s'en tient à la fécondité du système au point de vue de la formation des travailleurs (1).

Le véritable reproche, nous le préciserons plus loin; il vise la sélection intensive et l'absence de contrôle physiologique. Le Taylorisme, que nous ignorions au début de nos travaux, a pe-

(1) J. Edwards (*Journal The Amer. Soc. Naval Engineers*, mai 1912); Schuchart (*Technik und Wirtschaft*, janvier 1913).

nétre presque partout, et donné lieu à une abondante littérature. C'est, à vrai dire, un mouvement destiné à transformer les relations des employeurs et des employés sur les bases, nécessaires et suffisantes, de la *participation aux bénéfices* dus aux grands rendements.

Complété, appuyé par les enseignements de la *Psycho-physiologie*, le Taylorisme synthétisera un jour les acquisitions les plus solides touchant l'organisation du travail humain.

On l'a déjà montré en métallurgie, en chimie <sup>(1)</sup>, dans la fabrication du caoutchouc <sup>(2)</sup>, dans la construction, dans la manutention du combustible <sup>(3)</sup>, dans le fonctionnement des administrations <sup>(4)</sup>, les jeux <sup>(5)</sup>, théâtres, ouvrages agricoles.

Il y a, dans chaque forme de notre activité, matière à enquête, analyse, expériences méthodiques, pour en obtenir la part la plus élevée en utilité sociale.

Dans l'exposé que nous allons faire des nombreux modes de travail humain, des méthodes et une technique rigoureuses n'ont pas toujours été employées ; ce sera donc, si l'on veut, de la documentation, une source de renseignements provisoires qui, un jour, seront remplacés par des principes scientifiques et des résultats certains.

**318. Classification des travaux professionnels.** — Nous adopterons provisoirement l'ordre d'exposition suivant : 1° travaux où le poids du corps humain agit seul ; 2° travaux mettant en action les muscles des bras ; 3° travaux mettant en action les muscles des jambes ; 4° travaux variés.

Si l'on possédait tous les éléments de cette étude, on suivrait un ordre alphabétique des professions, ou bien on y distinguerait les *Exercices de force* et les *Exercices de vitesse*. Ne pouvant le faire, nous nous sommes résolu à grouper ceux de ces éléments — de valeur très inégale — qui nous sont connus.

**A. Action du poids de l'homme. — Travail du carrier sur**

(1) Kochmann (*Zeitsch. Angew. Chemie*, vol. XXVII, juillet 1914 ; Leipzig).

(2) Edgar Herbst (*Gummie Zeitung*, 21 novembre 1919 ; Vienne).

(3) Paul Negrier, *Organisation technique et commerciale des usines* ; Paris, 1918 (Dunod).

(4) Jules Amar (*Mon Bureau*, 15 septembre 1920 ; *L'Exportateur français*, 19 décembre 1921).

(5) G. D. Barcock (*Industrial Management*, décembre 1916 ; — février 1917).

la roue à chevilles. — La roue à chevilles ou treuil des carriers (§ 243 et *fig. 285*) sert encore dans quelques carrières pour élever les pierres par les puits. Le poids de l'homme, qui grimpe sur les échelons, constitue la puissance  $P$ , et

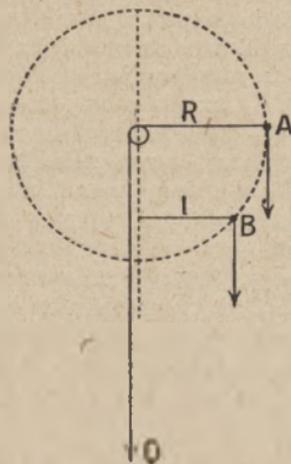


FIG. 285. — Schéma d'une roue à chevilles.

cette puissance, suivant qu'elle agira au niveau (A) ou bien *au-dessous* (B) de l'axe, aura pour bras de levier le rayon  $R$  de la roue, ou seulement sa distance  $l$  au plan passant par l'axe. Soit  $Q$  la résistance à élever. On écrira :

Moment moteur  $P \times R$  ou  $P \times l =$  Moment résistant  $Q \times r$ ,

$r$  étant le rayon du cylindre d'axe.

D'où :

$$P = Q \times \frac{r}{R} \quad \text{ou} \quad P = Q \times \frac{r}{l}$$

L'ouvrier agit toujours au-dessous de l'axe, car, si son moment l'emporte sur celui de la résistance, il descendra, si le moment de la résistance l'emporte, il montera; dans ces conditions, le mouvement du treuil a lieu quand la puis-

sance tend à s'approcher du niveau de l'axe sans y être absolument.

Le travail par rotation est  $2\pi R \times P$ . Pour  $n$  tours dans la journée, on aura :

$$\mathcal{E} = 2\pi Rn \times P.$$

Remplaçant  $P$  par sa valeur, on écrira aussi :

$$\mathcal{E} = 2\pi Rn \times Q \times \frac{r}{l} \quad \text{ou} \quad 2\pi rn \times Q.$$

Les frottements qui ont lieu sur les tourillons augmentent le travail résistant.

En général, la vitesse dépend du point d'application de la puissance. Navier observa une vitesse de  $0^m,15$  pendant une durée de huit heures, l'homme agissant au niveau de l'axe. Alors son poids, de 60 kilogrammes, produit tout son effet. Navier calcule :

$$\mathcal{E} = 0,15 \times 60 \times 3.600 \times 8 = 259.200 \text{ kilogrammètres.}$$

La vitesse est de  $0^m,70$  quand l'homme agit au bas de la roue, à  $24^\circ$ ; alors son effort est seulement de 12 kilogrammes; ce qui conduit, en huit heures, à un travail :

$$\mathcal{E} = 0,70 \times 3.600 \times 8 \times 12 = 241.920 \text{ kilogrammètres.}$$

Ainsi, d'après Navier, l'homme fournit 250.000 kilogrammètres par jour en s'élevant sur une roue à chevilles.

Cette manière de travailler, qui provoque des étourdissements et mérite l'épithète de barbare, a été appliquée aux détenus anglais pour moudre, filer, etc.; hommes et femmes faisaient marcher les « roues pénitentiaires », fournissant un travail évalué comme suit par la statistique officielle :

| Localités            | Travail                |
|----------------------|------------------------|
| Northampton.....     | 143.643 kilogrammètres |
| Nottingham.....      | 174.360 —              |
| Devonshire.....      | 195.625 —              |
| Middlesex.....       | 212.946 —              |
| Cambridge.....       | 259.690 —              |
| Boston.....          | 281.104 —              |
| Warwick.....         | 205.517 —              |
| — .....              | 274.022 —              |
| — .....              | 342.529 —              |
| Moyenne générale.... | 231.000 kilogrammètres |

319. B. *Action des bras*. — **Travail au treuil et au cabestan.**  
 — La manœuvre du treuil se fait au moyen des muscles des bras (voir § 55), et il en est de même, dans la *halage*, de la manœuvre au *cabestan*.

Navier évaluait à 12 kilogrammes l'effort de l'homme travaillant au cabestan, à une vitesse de 0<sup>m</sup>,60. En huit heures, la quantité de travail sera :

$$12 \times 0,6 \times 3.600 \times 8 = 207.400 \text{ kilogrammètres environ.}$$

Par seconde, le travail est de 0<sup>m</sup>,60  $\times$  12 = 7<sup>kgm</sup>,20.

En étudiant les conditions du *travail maximum* dans la manœuvre du treuil, c'est-à-dire de la *manivelle*, Schultze et Langsdorf ont obtenu un travail de 10 à 11 kilogrammètres par seconde. Pour le premier, il faut un effort de 13<sup>kg</sup>,70 et une vitesse de 0<sup>m</sup>,74; pour le second, un effort de 13<sup>kg</sup>,30 et une vitesse de 0<sup>m</sup>,757 (voir § 131). Huit heures de travail effectif produiront donc :

$$13,7 \times 0,74 \times 3.600 \times 8 = 291.574 \text{ kilogrammètres}$$

$$13,3 \times 0,757 \times 3.600 \times 8 = 287.081 \quad \text{—}$$

soit une quantité de..... 290.000 kilogrammètres environ,

qui dépasse de la moitié la production habituelle. En réalité, la durée du travail effectif tombe à six heures quand on

développe un tel effort et marche à la vitesse de  $0^m,75$ ; le travail journalier est, ainsi, vraisemblablement de :

$$\frac{290.000 \times 6}{8} = 218.000 \text{ kilogrammètres.}$$

Les expériences les plus correctes indiquent de ne pas réduire vitesse et effort *au-dessous de  $0^m,50$  et 15 kilogrammes*. Hachette (1769-1834), en faisant travailler *lentement et faiblement* :  $3^{kg},8$  par seconde, obtint un travail journalier de *110.000 kilogrammetres* à peine.

320. La puissance musculaire, agissant sur une manivelle, développe une quantité de travail variable. Ce ne sont pas *uniquement* les muscles des bras qui fournissent l'effort nécessaire, car le poids de l'homme intervient par sa composante horizontale. En général, l'ouvrier adopte une direction faisant  $65^\circ$  avec celle que doit prendre la manivelle, et il agit par un levier ayant son appui à la hauteur des reins, soit aux  $\frac{3}{5}$  de la taille; s'il pèse 65 kilogrammes, son effort sera :

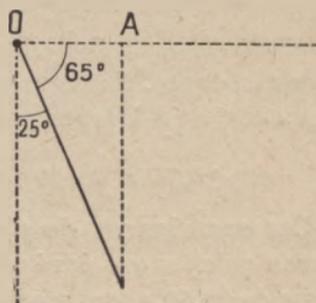


FIG. 286.

$$\frac{65 \times 3}{5} = 39 \text{ kilogrammes.}$$

La composante efficace sera (*fig. 286*) :

$$OA = 39 \times \sin 25^\circ \text{ (ou } \cos 65^\circ) = 39 \times 0,423 = 16^{kg},500.$$

Si le corps s'inclinait de  $45^\circ$ , cette composante serait :

$$39 \times 0,707 = 27^{kg},600,$$

mais aussi l'équilibre de l'homme serait en défaut.

Un des plus anciens observateurs, Sauveur, avait constaté les valeurs de  $12^{kg},24$  (ou 25 livres) et de  $0^m,51$  pour un tra-

vail continu de 8 heures. On calculera donc :

$$12,24 \times 0,51 \times 3.600 \times 8 = 260.000 \text{ kilogrammètres environ,}$$

et c'est un maximum (1). En rapportant ce résultat, Lazare Carnot (2) parle d'une vitesse de 0<sup>m</sup>,97; c'est là une erreur dont nous ne voyons pas l'origine.

Coulomb (3) conteste même que, dans un travail continu, il soit possible de déployer un effort de 12 kilogrammes; il trouve que cette pression « ne peut pas s'estimer au delà de 7 kilogrammes ». La poignée de la manivelle parcourt, dans ses expériences, une circonférence de 2<sup>m</sup>,30 de tour, et fait 20 tours par minute. Coulomb considère une durée effective de 6 heures, d'où :

$$7 \times 2,30 \times 20 \times 60 \times 6 = 116.000 \text{ kilogrammètres,}$$

à la vitesse moyenne de  $\frac{2,30 \times 20}{60} = 0^m,77$ .

Il est rare que l'ouvrier dépasse une vitesse de 0<sup>m</sup>,80. Mais, pour la durée, Navier a pu la porter à huit heures, adoptant un effort de 8 kilogrammes et une vitesse de 0<sup>m</sup>,75. On a :

$$8 \times 0,75 \times 3.600 \times 8 = 172.800 \text{ kilogrammètres.}$$

Les expériences de Christian (4) sont plus instructives parce qu'elles ont duré trois mois sans interruption, à la vitesse de 0<sup>m</sup>,50, avec un effort de 14 kilogrammes et *sept heures* par jour, elles conduisent à peu près à la même valeur :

$$14 \times 0,50 \times 3.600 \times 7 = 176.400 \text{ kilogrammètres.}$$

On adoptera donc ces conditions de travail.

Au travail utile ainsi évalué, on doit ajouter celui de l'abaissement et redressement de la moitié supérieure du corps. Le moment d'inertie I est 0,86 environ. L'oscillation correspond à un déplacement angulaire de 65° par demi-tour de la

(1) Belidor (*Architecture hydraulique*, I, p. 72. déjà cite).

(2) L. Carnot, *Essai sur les machines*, 1786.

(3) *Loc. cit.* — *Bull. Soc. ing. civ.*, février 1885.

(4) Christian, *Mécanique industrielle*, 1822, t. I., 114.

manivelle, ou  $130^\circ$  par tour, en  $\frac{60}{20} = 3$  secondes <sup>(1)</sup>, c'est un déplacement de  $43^\circ$  par seconde. Effectuant le calcul comme plus haut (§ 285), on aura, par tour de manivelle, un travail de :

$$\frac{1}{2} \times 0,86 \times \frac{\pi^2 \times 43^2}{180^2} \times \frac{152}{100} = 0^{\text{kgm}},368.$$

En 8 heures, les  $20 \times 60 \times 8$  tours donneront un travail musculaire de :

$$9.600 \times 0,368 = 3.533 \text{ kilogrammètres environ.}$$

Certains auteurs ont calculé des valeurs beaucoup plus grandes qui ne se justifient pas.

**322. Traction verticale sur cordes : sonnettes à tiraudes, etc.** — Toutes les fois que la puissance musculaire P aura à s'exercer sur une corde passant sur poulie fixe, elle devra surmonter la résistance utile Q et les frottements (ceux des tourillons, la raideur de la corde). Aussi, en intercalant un dynamomètre sur le brin tirant (§ 230), trouvera-t-on toujours :

$$P > Q.$$

Il en est ainsi, par exemple, dans la manœuvre de la *sonnette à tiraudes* (§ 238).

Dans les expériences de Coulomb, les hommes élevaient à une hauteur de  $1^{\text{m}},10$  la masse du *mouton* (pour battre les pieux en les laissant retomber librement); ce mouton pesait de 350 à 450 kilogrammes, et le dynamomètre accusait un effort moyen de 19 kilogrammes par homme.

On battait 20 coups à la minute et 80 coups de suite (*une volée*); pour une durée effective de trois heures, le battage représentait donc un travail de :

$$19 \times 1,10 \times 20 \times 60 \times 3 = 75.200 \text{ kilogrammètres.}$$

A la construction du pont d'Iéna (1808), on travailla

(1) Coulomb notait 20 tours par minute.

10 heures par jour ; la levée du mouton fut de 1<sup>m</sup>,45 ; on donnait 12 volées de 30 coups par heure avec un mouton de 587 kilogrammes, manœuvré par 38 hommes, soit 15<sup>kg</sup>,45 par ouvrier. On évalue donc le travail à :

$$30 \times 12 \times 15,45 \times 1,45 \times 10 = 80.648 \text{ kilogrammètres.}$$

Le travail de l'homme, dans cette manœuvre, paraît osciller autour de cette valeur de 80.000 kilogrammètres. En voici un autre exemple :

A la Monnaie de Paris, deux hommes soulevaient un mouton de 38 kilogrammes à une hauteur de 0<sup>m</sup>,40 et battaient 5.200 coups dans la frappe des pièces de monnaie. Coulomb remarqua qu'un seul ouvrier aurait suffi à cette besogne, équivalente à un travail de :

$$38 \times 0,40 \times 5.200 = 79.000 \text{ kilogrammètres.}$$

La quantité déterminée dans ces expériences est relative à un effort de 20 à 30 kilogrammes. Or, nous avons montré que les conditions du meilleur travail sont : 13 kilogrammes comme effort maximum des bras, et une vitesse de 0<sup>m</sup>,75 tout au plus (§ 131) ; nous ne devons donc pas nous étonner si la manœuvre de la sonnette est une des plus désavantageuses à l'utilisation de la force humaine.

323. Les expériences sur le *puisage de l'eau* confirment cette assertion. En effet, un homme a élevé des poids de 18 kilogrammes à la vitesse de 0<sup>m</sup>,20, en faisant usage d'une corde passant sur une poulie ; la corde redescendait à vide. Il put travailler effectivement six heures, produisant <sup>(1)</sup> :

$$18 \times 0,20 \times 3.600 \times 6 = 77.760 \text{ kilogrammètres.}$$

Toujours cette faible quantité déjà trouvée par divers auteurs.

Coulomb fit élever de l'eau d'un puits profond de 37 mètres

(1) Observation de Navier (*loc. cit.*).

L'effort de traction marqué au peson était de 16 kilogrammes ; on puisa la quantité de 120 seaux, ceux-ci s'élevant à une vitesse de 0<sup>m</sup>,20. Le travail fut donc de :

$$37 \times 16 \times 120 = 71.000 \text{ kilogrammètres environ (1).}$$

Cela conduit à une durée effective de six heures. Le travail résistant dû à la descente des seaux à vide, ajouté au travail moteur, nous ramène à 80.000 kilogrammètres, à peu près comme précédemment.

Si, par contre, un homme élève un poids de 6 kilogrammes avec une vitesse de 0<sup>m</sup>,75, Navier observe qu'il pourra travailler dix heures, et produire 162.000 kilogrammètres, soit le double de la quantité ci-dessus :

$$6 \times 0,75 \times 3.600 \times 10 = 162.000 \text{ kilogrammètres.}$$

Le *puisage de l'eau* est une manœuvre tout à fait primitive qui tend à ne plus s'effectuer à bras d'homme ; elle est aussi des plus pénibles. Un homme, épuisant l'eau d'un bassin à l'aide de seaux ou de baquets, sans se servir de corde et de poulie, ne produit que 45.000 à 50.000 kilogrammètres par journée de huit heures (2). En employant une *écope*, notamment l'écope hollandaise (voir § 238), il fournira, dans le même temps, de 100.000 à 120.000 kilogrammètres (3).

Un seau, manœuvré par une corde enroulée sur un treuil, permettrait un travail de 150.000 à 160.000 kilogrammètres (4). Le *manège des maraîchers* est certainement le plus économique : il a un rendement de 200.000 kilogrammètres environ.

Les pompes, manœuvrées à bras d'hommes, ont un effet utile de 150.000 kilogrammètres par journée de 10 heures, et cet effet nécessite une dépense musculaire de 260.000 kilogrammètres, d'après les évaluations de M. Armand Gautier (5). L'effort moyen et la vitesse atteignaient 13 kilogrammes et 0<sup>m</sup>,60, conditions très favorables.

(1) *Loc. cit.*

(2) Perronet (1708-1794).

(3) Divers observateurs (Belidor, Perronnet, d'Aubuisson).

(4) D'Aubuisson.

(5) Voir § 136 ci-dessus.

Les indications que nous venons de donner sur le puisage et le baquetage à bras montrent que c'est un mode d'activité extrêmement fatigant dont la disparition s'impose partout où les machines peuvent être établies.

**323. Manœuvre du marteau.** — Hubert (1) étudia la manœuvre du marteau, en faisant varier seulement la vitesse et l'amplitude du mouvement. Avec un marteau de 7<sup>ks</sup>,065 décrivant une circonférence entière, un sujet a pu donner 1.690 coups par jour et produire un travail de 65.000 kilogrammètres (voir, § 240, la manière de calculer ce travail). Si le marteau est mû suivant un arc de circonférence seulement (60°), et à une *vitesse moindre*, le même forgeron frappe 2.560 coups et produit un travail de 67.000 kilogrammètres dans sa journée.

Malheureusement, il n'a pas été fait d'études rigoureuses de la forme, de la vitesse et du poids optimums du marteau. Hubert reconnut, toutefois, qu'avec un léger marteau, comme celui du cloutier, on peut produire 150.000 à 160.000 kilogrammètres par jour.

Gilbreth, cet ingénieur qui sut appliquer très habilement les principes de Taylor, remarque que le poids du marteau a une réelle importance dans l'*art du maçon*. S'agit-il de fendre les blocs de granit? Un marteau de 12 kilogrammes le ferait en cinq coups, un marteau de 5 kilogrammes en nécessiterait près d'une centaine. S'agit-il du marteau à casser ou de celui qui sert à creuser des trous dans le granit? Le rendement maximum exige qu'ils aient pour poids respectivement 1<sup>ks</sup>,800 et 1<sup>ks</sup>,950.

Chaque métier nécessite une forme et une masse appropriées pour cet outil. Ainsi, le marteau du charpentier pèse environ 5<sup>ks</sup>,500 et possède un manche de 0<sup>m</sup>,50 à peu près. Dans le forgeage, les marteaux sont très lourds, et ils doivent l'être (§ 43).

Le rythme des coups de marteau varie également d'une profession à une autre. Par exemple, j'observe qu'un char-

(1) J.-B. Hubert (1781-1845), ingénieur à l'arsenal de Rochefort (*Annales Maritimes*, 1818, tome V, 2<sup>e</sup> partie, p. 939). Cité § 193.

pentier frappe 60 coups par minute pour planter des pieux, et son bras décrit une demi-circonférence à la vitesse de  $7^m,50$  par seconde.

A cette vitesse moyenne correspond une énergie de :

$$\frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{5,50}{9,81} \cdot 7,5^2 = 15^{\text{kgm}},75 ;$$

en comptant la double oscillation du marteau on aura  $31^{\text{kgm}},50$ .

L'ouvrier a fait, dans sa journée, un enclos de 350 pieux ; le travail comprenait  $350 \times 11$  coups de marteau, à raison de 11 par pieu. Au total, on a :

$$31,50 \times 11 \times 350 = 121.276 \text{ kilogrammètres.}$$

Si l'on y ajoute les petites manœuvres accessoires, le travail de déplacement de l'ouvrier le long de l'espace à enclore, et si on calcule l'effet des  $350 \times 11 = 3.850$  oscillations du bras <sup>(1)</sup>, l'action musculaire totale sera d'environ  $130.000$  kilogrammètres par jour.

324. Cette observation, relative au charpentier frappant du marteau, indique un travail de huit heures environ.

Mais notre analyse, poursuivie depuis deux ans et non achevée, du *martelage* en général, y révèle de nombreux éléments <sup>(2)</sup>.

La pratique du marteau est difficile. Le *forgeage*, qui doit modifier la forme du métal chauffé au rouge, demande à la fois des muscles et du coup d'œil. Car il emploie des marteaux d'autant plus lourds que la pièce à forger est plus massive et plus dure.

Le poids des marteaux à main ne peut dépasser 10 kilogrammes, même pour un ouvrier bon *frappeur*. Celui du cloutier est de 450 à 500 grammes seulement. Ici, le manche a 35 à 40 centimètres de long, là  $0^m,50$  à  $0^m,65$ .

$$3.850 \times 0,6 = 2.310 \text{ kilogrammètres.}$$

(1) Le moment d'inertie du membre supérieur étant 0,03, on calcule un travail de  $0^{\text{kgm}},60$  à peu près à chaque oscillation ; soit en tout :

(2) J. Amar, *Organis. physiol.*, p. 322.

Nous avons trouvé que la fatigue est moindre, *par kilogramme produit*, lorsque les ouvriers de petite taille manœuvrent des marteaux à manche plus court que celui des ouvriers de grande taille.

La fatigue est moindre aussi lorsque l'*enclume* repose sur un sol dur, de sorte que la force vive du *choc* sert, en partie, à renvoyer le marteau, et soulage les muscles.

Les détails concernant l'usage de chacun de ces outils, et suivant le travail à effectuer, sont très nombreux. Ils conduisent à ceci :

Pour un ouvrage déterminé, il y a un meilleur rendement si le marteau est à la limite inférieure de son poids, et s'il est mû avec la plus grande vitesse.

On peut adopter, en principe, que le frappeur à la *volée* donnera de 30 à 15 coups par minute, avec des marteaux de 7 à 12 kilogrammes, et de 40 à 50 coups si le marteau ne pèse que 5 kilogrammes.

Les petits marteaux de 1 à 2 kilogrammes doivent donner au moins 60 coups par minute.

Comme nous allons le voir plus longuement pour le *limeur*, il est avantageux de travailler 5 à 6 minutes, et de reposer les bras pendant 1 minute. Du reste, la préparation des *chaudes* laisse un repos plus grand.

Quant à la journée ouvrière, elle sera de 7 heures pour le forgeron, de 8<sup>h</sup>,30 dans les travaux plus légers (cloutiers, orfèvres, etc.).

**325. Manœuvre de la lime.** — Elle a été spécialement étudiée dans le travail des métaux <sup>(1)</sup>. Le limeur exerce une pression pour mordre sur le métal, et un effort horizontal pour faire glisser l'outil à une vitesse déterminée. Analy sant ces efforts, nous trouvons en général :

Une composante verticale et une composante horizontale de l'action musculaire du bras droit; il en est de même pour le bras gauche (*fig.* 287); les composantes verticales V et V' s'ajoutent pour enfoncer la lime dans le métal; les composantes horizontales H et H' déterminent le mouvement et

(1) Jules Amar (*Journal de Physiol.*, janvier 1913, p. 62; — *Comptes rendus Acad. Sciences*, nov. 1912).

effectuent le travail mécanique proprement dit. Soit  $l$  la longueur utilisée de la lime à l'aller; ce travail sera :

$$(H + H') \times l.$$

Soit  $n$  le nombre de coups de lime; le travail total en charge sera :

$$(H + H') \times l \times n.$$

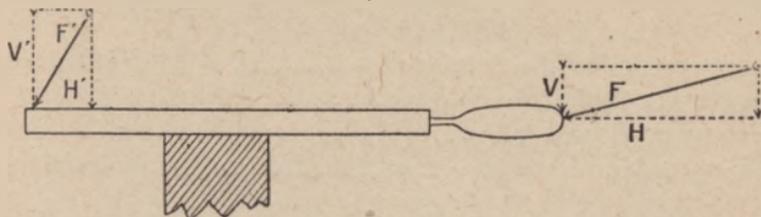


Fig. 287. — Décomposition des efforts des bras du limeur.

Il est évident que les forces  $V$  et  $V'$  ne travaillent pas; on pourrait, sans modifier la quantité d'ouvrage, les remplacer par un poids qui presse l'outil sur la matière.

Mais il faut tenir compte des *retours à vide*. A chaque coup de lime, un effort  $h$  est nécessaire pour ramener celle-ci à sa position initiale; cet effort a pour *limite inférieure* le poids nécessaire pour faire glisser la lime sur le métal donné, c'est-à-dire la valeur de ce frottement.

Le travail total, allers et retours compris, est le suivant :

$$(H + H' + h) l \times n,$$

s'il y a  $n$  coups de lime dans le temps considéré.

A côté de cette valeur dynamique, nous placerons la valeur de l'effort musculaire dépensé par chaque bras, calculée d'après le principe du parallélogramme.

Cette évaluation est nécessaire, car l'organisme n'effectue pas sa dépense d'énergie en proportion du *travail utile*, de l'effort qui déplace la résistance, mais bien exactement de l'ensemble des contractions musculaires, celles-ci considérées statiquement et dynamiquement.

326. TECHNIQUE. — Nous avons mesuré les composantes des efforts dans le travail du limeur, c'est-à-dire  $V$ ,  $H$ ,  $V'$ ,  $H'$  et  $h$  (voir fig. 287); les limes sont, généralement, de poids et de

formes différents; il en est dont la *taille* est rude et profonde, d'autres — les *limes moyennes* pour métaux<sup>2</sup> — sont taillées plus finement. Nous avons choisi la lime, dite *demi-douce* ou n° 2, à section rectangulaire; elle est taillée sur les deux faces et un côté; sa largeur est constante, mais son épaisseur va en diminuant jusqu'à son extrémité libre pour lui donner une certaine convexité. On a:

|   |                |
|---|----------------|
| Longueur de la lime demi-douce.....           | 34 centimètres |
| Longueur <i>utilisée</i> dans le travail..... | 26 —           |
| Largeur uniforme.....                         | 3,20 —         |
| Épaisseur décroissante .....                  | 1,00 à 0,55    |

L'outil est de bonne *trempe* et n'offre aucune trace de déformation.

Pour mesurer les efforts, on s'est servi de la méthode d'enregistrement graphique de Marey. En principe, les muscles

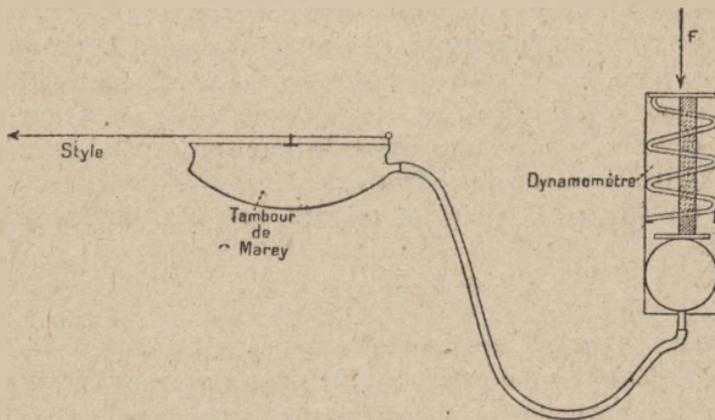


FIG. 288.

agiront sur des ressorts de force convenable, se déformant très peu dans les conditions de l'expérience, et chacun de ces ressorts vient comprimer par un disque qui le termine une petite poire en caoutchouc. On conjugue la poire avec un tambour inscripteur de Marey, suivant le schéma de la figure 288, et on donne au style un degré d'amplification qui assure aux tracés une clarté suffisante. Ces dispositifs dynamographiques sont appliqués au manche de l'outil, à l'ex-

trémité où agit la main gauche, et sous la pièce à limer. On les a décrits dans la technique (§ 223).

Ils permettent d'enregistrer la pression totale ( $V + V'$ ) des deux mains, et d'en déduire  $V$ , composante verticale de l'effort du bras droit, puisqu'on a directement enregistré  $V'$ . Et l'on a aussi isolément,  $H$  et  $H'$ .

Le poids total de la lime, ainsi munie de ses mécanismes, s'est élevé à 1.850 grammes ; nous aurons à l'ajouter à la pression ( $V + V'$ ) en effectuant nos calculs.

Dans les *retours à vide*, la lime glisse sur le métal employé — un bloc de *laiton* — sous une charge de 550 grammes ; c'est l'effort de glissement *minimum* dans les retours de l'outil (*fig. 223*) ; il conduit à un coefficient de frottement :

$$f = \frac{0,550}{1,850} = 0,30 \text{ environ.}$$

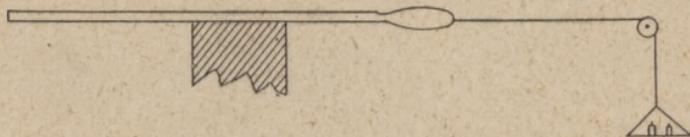


FIG. 289. — Glissement de la lime sur le métal.

L'ouvrier se place donc devant l'étau, à hauteur déterminée que l'on peut modifier au moyen d'un escabeau posé sous les pieds ; cette hauteur, l'attitude plus ou moins penchée de l'ouvrier, influent sur le travail et la fatigue ; elles seront étudiées plus loin.

Quant à la dépense d'énergie, qui correspond au travail effectué, nous l'évaluons d'après la *consommation d'oxygène*, et l'équivalent thermique du litre d'oxygène. On sait que l'analyse des gaz expirés au repos, puis au travail, dans le même temps, permet de mesurer l'*excès* de consommation d'oxygène dû à ce travail ; d'autre part, que le *quotient respiratoire*  $\frac{CO_2}{O_2}$  indique la valeur calorifique de cet excès, autrement dit la *dépense dynamique stricte*.

Le rythme respiratoire et la durée des expériences sont recueillis graphiquement à côté des efforts de l'ouvrier.

Pour le nombre des coups de lime on l'a laissé à la discrétion de celui-ci — *travail volontaire*, — et quelquefois on l'a imposé par la cadence d'un *métro*.

Nous n'insisterons pas davantage sur la manière dont les



FIG. 290. — Travail d'un apprenti limeur (agencement des appareils pour enregistrer les efforts et mesurer les échanges gazeux).

échanges gazeux sont réalisés : la *soupape à double valve* en est la condition ; elle a été décrite plus haut. On voit sur la figure 290 l'agencement général des appareils sur un apprenti ; en particulier, la soupape est maintenue au moyen d'un arc métallique qui se fixe sur la tête ; elle n'exige donc aucun effort ni aucune surveillance.

*Étalonnage des efforts.* — Les efforts musculaires étant

représentés par les ordonnées des tracés tels que les montre la figure 291, par exemple, nous évaluons ces ordonnées en kilogrammes. A cet effet, des poids marqués sont placés

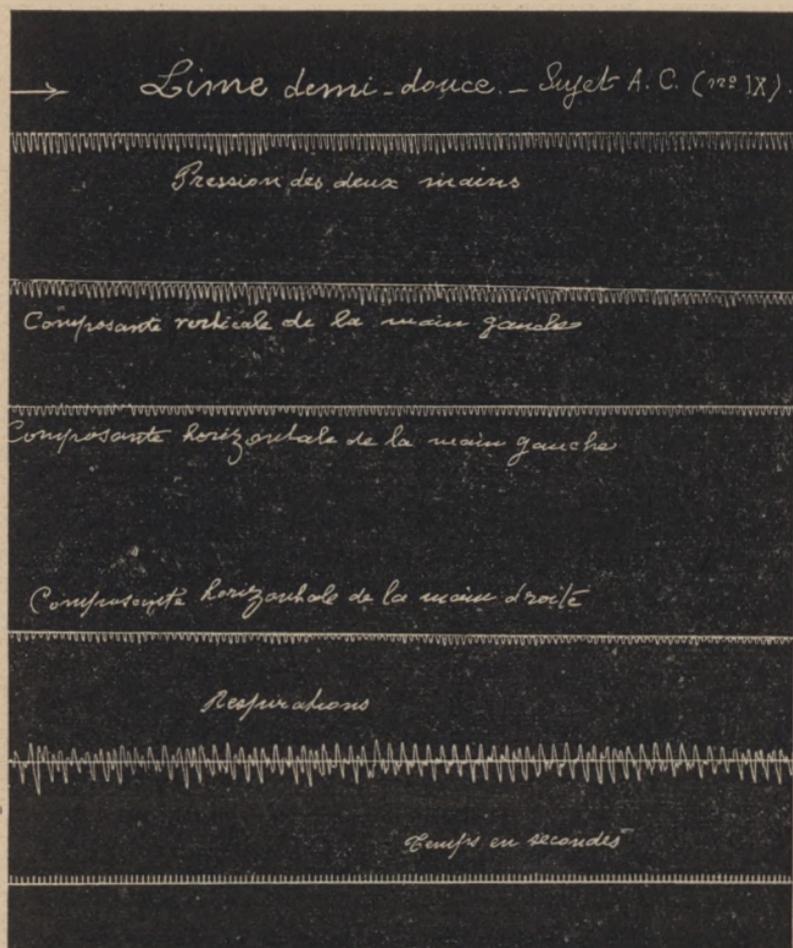


FIG. 291.— Graphique des efforts et des respirations d'un ouvrier limeur adulte.

aux points d'application des mains, soit directement, soit par l'intermédiaire d'une corde, et fournissent un *trace-étalon*. Dans ces conditions, on saura qu'un centimètre d'ordonnées équivaut à tant de kilogrammes. L'étalonnage doit être fait pour chaque dispositif dynamographique, pour

chaque catégorie d'efforts, car il est très difficile d'accorder tous les tambours récepteurs pour qu'ils admettent la même unité de mesure.

La figure 292 est celle d'un tracé d'éta-lonnage conforme aux indications précédentes : 1 centimètre d'ordonnée vaut respectivement 20, 17, 10 et 11 kilogrammes suivant les courbes considérées, en allant de haut en

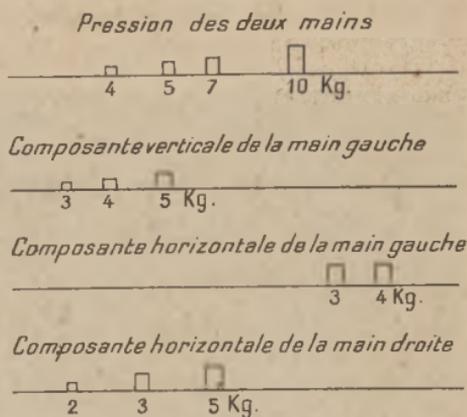


Fig. 292. --- Etalonnage des efforts.

bas. Sur ces bases, nous évaluerons les nombreux graphiques obtenus sur nos sujets d'expériences.

Remarquons, toutefois, que les bras de l'ouvrier exercent un *effort variable* pendant le coup de lime, effort dont la valeur *maximum* est celle que l'ordonnée indique ; mais cette valeur est si rapidement atteinte qu'elle peut être prise sans grande erreur.

Ajoutons qu'avant et après chaque expérience, le bloc de métal est pesé sur une balance sensible au milligramme ; on connaît ainsi le *poids de limaille* enlevée, c'est-à-dire la quantité d'ouvrage.

327. EXPERIENCES ET CALCULS. — Les sujets d'expériences ont été :

A. C., ouvrier mécanicien, trente-huit ans, poids de 74 kilogrammes, taille 1<sup>m</sup>,72, robuste et bien proportionné, ayant vingt années d'expérience ;

X. P., apprenti mécanicien, seize ans, poids de 55 kilogrammes, taille 1<sup>m</sup>,65, très vif d'allure sans être fort ; en apprentissage depuis deux ans.

Ces deux sujets ont servi régulièrement à un grand nombre d'expériences, exactement 57, réparties sur une durée totale de huit mois.

D'autres personnes ont été utilisées accidentellement (J. A., L. M., H. R., E. A., C. G.) et à titre comparatif, vu leurs professions différentes et étrangères à l'art du limeur.

Au total 62 expériences ont été faites dans les conditions relatées plus haut, l'homme travaillant sans gêne apparente dans une pièce maintenue au voisinage de 17°, l'air inspiré arrivant du dehors par une large canalisation. Voici le protocole d'une expérience sur l'ouvrier A. C. (Expérience n° IX).

a) Au repos, le sujet étant assis :

|  |                     |
|--|---------------------|
| Gaz expirés en 3 <sup>m</sup> ,50..... | 30 <sup>l</sup> ,25 |
| Rythme respiratoire par minute.....    | 18 respirations     |
| Température de la pièce.....           | 17°,50              |
| Hauteur barométrique.....              | 758 millimètres     |

L'analyse eudiométrique des gaz a donné :

|                          |   |
|--------------------------|---|
| CO <sup>2</sup> 0/0..... | 3,15  |
| O <sup>2</sup> 0/0.....  | 17,40, soit une absorption de (21 — 17,40) = 3,60 0/0         |
| Quotient respi-          |   |
| ratoire.....             | $\frac{\text{CO}^2}{\text{O}^2} = \frac{3,15}{3,60} = 0,875.$ |

Le volume gazeux, ramené à 0° et 760 millimètres est de : 28<sup>l</sup>,41.

La consommation d'oxygène de l'ouvrier, au repos, et en 3<sup>m</sup> 30<sup>s</sup>, est donc :

$$\frac{28,41 \times 3,60}{100} = 1,022760,$$

à 0° et 760 millimètres, ou bien par heure :

$$\frac{1,02276 \times 60}{3,5} = 17<sup>l</sup>,533.$$

b. Au travail, les circonstances ont été les suivantes : le sujet adopte telle position qui lui convient à la condition qu'elle demeure sensiblement la même dans toutes les expériences. La place des pieds est marquée, la hauteur de l'étau est constante, l'attitude du corps est ainsi à peu près déterminée et invariable.

Le sujet A. C. (fig. 293) travaille 3<sup>m</sup> 30<sup>s</sup> sans interruption au rythme de 54 coups de lime par minute (cas de l'expérience n° IX). Evaluons d'abord sa dépense d'énergie :

|  |                 |
|--|-----------------|
| Gaz expirés en 3 <sup>m</sup> ,50..... | 70 litres       |
| Rythme respiratoire par minute.....    | 28 respirations |
| Température de la pièce.....           | 17°,50          |
| Hauteur barométrique.....              | 758 millimètres |

L'analyse eudiométrique des gaz a donné :

|                          |   |
|--------------------------|---|
| CO <sup>2</sup> 0/0..... | 3,70  |
| O <sup>2</sup> 0/0.....  | 17,20, soit une absorption de (21 — 17,20) = 3,80 0/0         |
| Quotient respi-          |   |
| ratoire.....             | $\frac{\text{CO}^2}{\text{O}^2} = \frac{3,70}{3,80} = 0,973.$ |

Le volume gazeux, ramené à 0° et 760 millimètres, est de : 66',455.  
La consommation d'oxygène est :

$$\frac{66,45 \times 3,80}{100} = 2',52531,$$

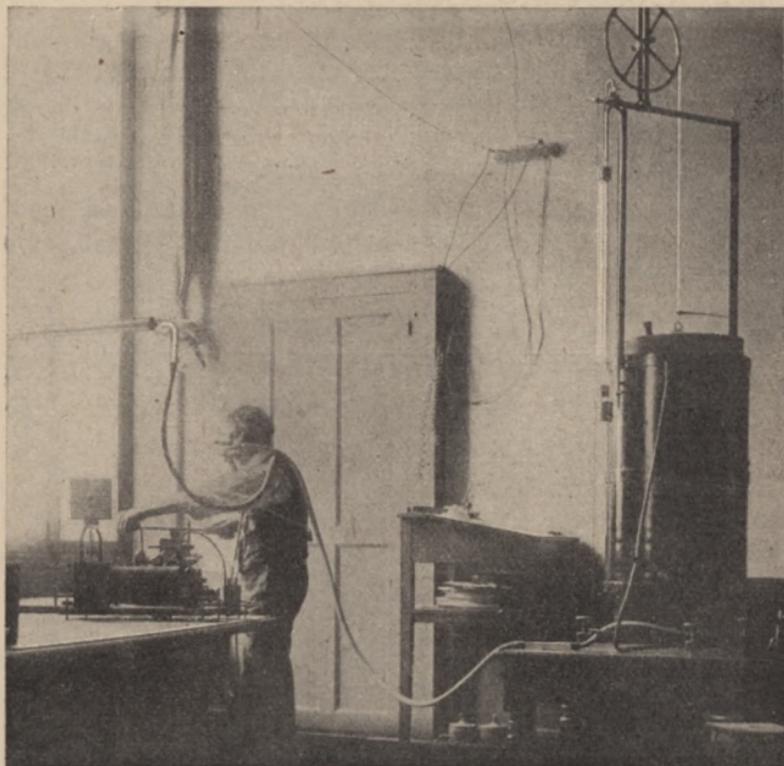


Fig. 203. — Travail d'un ouvrier limeur adulte.

soit par *heure*, et à 0° et 760 millimètres

$$\frac{2,52531 \times 60}{3,5} = 43',291,$$

Pour évaluer en grandes calories la consommation d'oxygène, nous prendrons 4<sup>Cal</sup>,90 et 5<sup>Cal</sup>,05 comme pouvoirs comburants par litre au repos du sujet et pendant son travail ; c'est ce que le quotient respiratoire indique. Disons aussi que toutes nos expériences avaient lieu à partir de 9 heures du matin, et que, depuis le réveil, l'homme n'absorbe qu'une grande tasse de café léger et bien sucré, vers les sept heures. Donc, la dépense énergétique par heure et en

calories sera :

$$\begin{array}{l} \text{Au repos} \dots\dots\dots 17,533 \times 4,90 = 85^{\text{Cal}},911 \\ \text{Au travail} \dots\dots\dots 43,291 \times 5,05 = 218 \text{ ,}621 \end{array}$$

D'où une *Dépense dynamique stricte* de

$$218,621 - 85,911 = 132^{\text{Cal}},71.$$

328. Considérons, maintenant, l'activité des muscles :

1° Les ordonnées représentatives de la *pression des deux mains* sur l'étai, portées bout à bout au compas sur une ligne droite, puis évaluées en kilogrammes, donnent 1.580 kilogrammes pour 158 coups de lime. On en déduit une pression moyenne ou

$$V + V' = \frac{1.580}{158} = 10 \text{ kilogrammes.}$$

Il est à peine besoin de signaler que le zéro du tracé est donné par la lime reposant sur le métal sans action des bras ; mais la pression totale sur l'étai est  $(V+V')$  augmentée du poids de la lime qui est  $1^{\text{kg}},850$ . Dans notre expérience, ce sera :

$$10 + 1,850 = 11^{\text{kg}},850.$$

2° Les mêmes opérations fournissent pour la *composante horizontale de la main droite* :

$$\frac{348 \text{ kg}}{158} = 2^{\text{kg}},20, \quad \text{soit} \quad H = 2^{\text{kg}},200.$$

3° A l'égard des *efforts du bras gauche*, nous obtenons :

$$\text{Composante horizontale} \dots H' = \frac{395}{158} = 2^{\text{kg}},500$$

$$\text{Composante verticale} \dots\dots V' = \frac{1.075}{158} = 6^{\text{kg}},800$$

Par suite :

$$V = 10 - 6,800 = 3^{\text{kg}},200.$$

En nous rappelant que la longueur utilisée de la lime est  $0^{\text{m}},26$  dans toutes nos expériences, longueur déterminée par *deux curseurs caoutchoutés* (voir fig. 190), que l'effort à l'*aller* atteint :

$$H + H' = 2,2 + 2,5 = 4^{\text{kg}},700,$$

et l'effort *au retour* :

$$h = 0^{\text{kg}},550,$$

le *travail* du coup de lime sera :

$$0,26 (4,700 + 0,550) = 1^{\text{kgm}},965.$$

On donnait 54 coups de lime par minute, ce qui produisait un travail horaire de :

$$1,365 \times 54 \times 60 = 4.422^{\text{kg}}, 60.$$

La limaille enlevée fut, par heure, de 45<sup>gr</sup>, 57.

Si nous calculons les efforts musculaires F et F' des bras droit et gauche, nous trouverons que, vu leur inclinaison sur l'outil, ils sont notablement supérieurs aux efforts utiles. Les figures 294 et 295 donneront immédiatement :

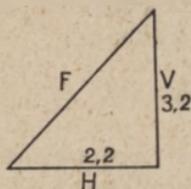


FIG. 294.

$$F = \sqrt{3,2^2 + 2,2^2} = 3^{\text{kg}}, 88;$$

$$F' = \sqrt{6,8^2 + 2,3^2} = 7^{\text{kg}}, 24.$$

L'effort du bras droit s'augmente de 0<sup>kg</sup>, 550, qu'il fournit à peu près seul au retour de la lime; mais il est généralement inférieur

à l'effort du bras gauche. Au total, c'est;

$$3,88 + 7,24 + 0,55 = 11^{\text{kg}}, 67,$$

contre 5<sup>kg</sup>, 250 d'efforts utiles. Le coefficient d'utilité est ainsi :

$$\frac{5,25}{11,67} = 44,9 \text{ 0/0}.$$

En d'autres termes, plus de 55 0/0 de la force musculaire sont absorbés dans la pression qui fait mordre la lime sur le métal. La manœuvre est donc pénible et dispendieuse.

Notons aussi ce fait curieux que les efforts des muscles s'exercent *successivement* et non simultanément. Enregistrons trois de ces efforts en plaçant les pointes des styles sur une même génératrice du cylindre enfumé tournant à grande vitesse, et prenons des tambours aussi semblables que possible, des tubes de caoutchouc de même longueur, nous trouverons cependant que la pression des deux mains sur l'étau s'exerce en *tout premier lieu*

(fig. 296), puis, à un intervalle de  $\frac{1}{100}$  de seconde, l'effort de la main

gauche suivi,  $\frac{11}{100}$  de seconde après, de l'effort de la main droite pour pousser la lime. Il s'ensuit que l'ouvrier *appuie d'abord* sa lime sur l'étau et ne la pousse que peu de temps après, ici  $\frac{1}{10}$  de seconde environ.

Connaissant, d'une part, la dépense stricte d'énergie par heure,

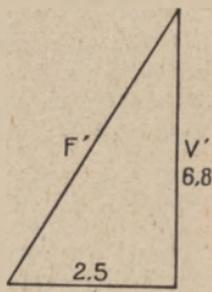


FIG. 295.

qui est  $132^{\text{Cal}},71$ , et d'autre part le travail effectué :  $4.422^{\text{kgm}},60$ , nous calculerons le coût du kilogrammètre :

$$\frac{132^{\text{Cal}},71}{4.422,60} = 0,^{\text{Cal}}03,$$

soit un rendement net de 80/0 environ.

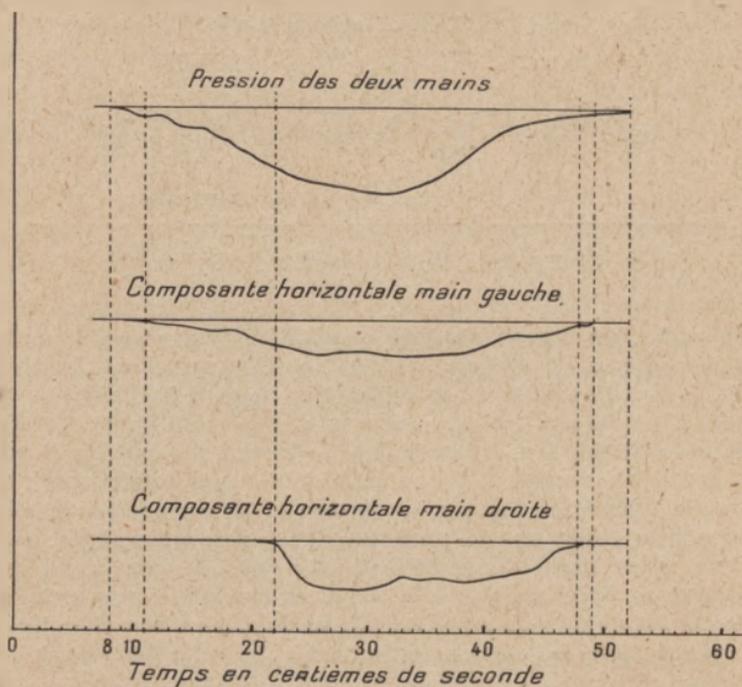


FIG. 296. — Analyse du coup de lime.

Dans l'expérience qui vient d'être décrite, un point quelconque de la lime parcourt :

$$54 \times 0^{\text{m}},26 \times 2 = 28^{\text{m}},08$$

par minute; c'est une vitesse moyenne (aller et retour) de :

$$\frac{28,08}{60} = 0^{\text{m}},468$$

par seconde.

Enfin, si nous calculons le coût du *gramme de limaille*, nous aurons :

$$\frac{132^{\text{Cal}},71}{45,57} = 2^{\text{Cal}},91.$$

Au point de vue physiologique, nous remarquons que le rythme de la respiration a passé de 18 à 28, soit une augmentation de 10, ou de 55,7 0/0 ; les inspirations sont prolongées au delà de la normale (fig. 297), avec un rapport  $\frac{\text{Exp.}}{\text{Insp.}} = 1,65$ . Le taux des pulsations passe de 72 à 89 ; l'accroissement est de :

$$\frac{89 - 72}{89} = 19,10 \text{ 0, 0.}$$

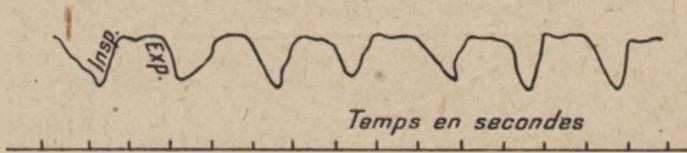


Fig. 297. — Trace respiratoire durant le travail à la lime.

En outre, un travail continu pendant 3.50 minutes détermine des phénomènes de *fatigue*, d'abord localisés au triceps brachial droit, à tout l'avant-bras, et particulièrement à l'articulation du coude. C'est ensuite le tour des doigts de la main droite. Le bras gauche se fatigue peu. Il semble que le travail des *extenseurs* soit tout à fait défavorable à l'économie et très mal conditionné ; au repos, le bras droit demeure en flexion et ne permet pas le relâchement, le vrai repos des muscles. Il est clair que ce bras, malgré un effort moindre, intervient avec plus de continuité que l'autre et se fatiguera plus vite. Dans un travail de longue durée, avec des intervalles de repos, la fatigue se généralise : elle atteint les épaules, puis les cuisses, les jambes et le buste tout entier.

329. INFLUENCES DIVERSES SUR LE TRAVAIL DU LIMEUR. — Nous avons multiplié les expériences dans le but d'en dégager quelques-uns des facteurs qui peuvent modifier, favorablement ou défavorablement, le travail de l'ouvrier limeur. Il est des *facteurs internes* tels que l'*alimentation*, l'état de santé physique et morale, la constitution du corps (taille, droitier ou gaucher), etc. ; mais il est surtout des *facteurs externes* plus importants ; ils sont relatifs à la *position des pieds*, à l'attitude du corps, à la manière de saisir l'outil, de le conduire et à la *vitesse* qui lui est imprimée. Les mouvements de l'homme ne doivent pas être embarrassés par des vêtements étroits, un entourage encombrant, un choc périodique qui en trouble le rythme, etc.

Sous le rapport de l'alimentation, les ouvriers limeurs (ajusteurs) développant beaucoup de force ont besoin d'une ration journalière de 3.500 calories, ou de 50 cal. par kg. de poids du corps.

Ce sont, ensuite, les sujets de grande taille, ou encore les moyens (1<sup>m</sup>,70), qui effectuent le plus d'ouvrage pour une même fatigue. Enfin, une *bonne vision* est nécessaire à l'exécution parfaite du travail à la lime ; elle en augmente la rapidité, sans que l'outil cesse d'aller droit ; elle saisit les inégalités qui appellent une action plus forte ici, et là plus légère.

Ce n'est point que l'expérience ne réussisse pas à suppléer aux défauts de la vue. J'ai même, durant la guerre de 1914, conseillé de former un atelier de *mécaniciens aveugles* ; et ceux-ci parvinrent, en assez peu de temps (trois à quatre mois), à limer et polir une pièce très correctement. D'abord ils se guidèrent par le *toucher* ; ensuite, ils n'eurent point de difficulté à régler la position et l'effort de leurs bras pour être certains de travailler aussi régulièrement que les ouvriers normaux.

La sensibilité du tact est du reste avantageuse dans ce genre d'exercices ; l'*oreille* y joue moins ce rôle de direction et rectification (1).

Les éléments qui viennent d'être considérés sont relatifs aux limes de grandes dimensions ; les petites (cas des orfèvres) exigent surtout de la vitesse et de l'ingéniosité, de l'attention, et plus d'art que de force. Ici la fatigue est le résultat précisément d'un excès d'attention.

Considérons maintenant le tableau suivant où se trouvent rassemblées presque toutes nos expériences. Il montre :

(1) *Organisation physiologique du travail*, pages 356 et suivantes.

| NUMÉROS<br>D'ORDRE           |         | COUPS<br>DE LIME<br>par<br>minute | EFFORTS MUSCULAIRES<br>PAR COUP DE LIME |                     | EFFORT<br>UTILE<br>des 2 bras | COEFFI-<br>CIENT<br>D'UTILITÉ | TRAVAIL<br>par<br>HEURE |
|------------------------------|---------|-----------------------------------|---|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
|                              |         |                                   | Bras droit                              | Bras gauche         |                               |                               |                         |
| 1                            |         | 2                                 | 3                                       | 4                   | 5                             | 6                             | 7                       |
| 1                            | IV      | 33,14                             | 4 <sup>kg</sup> ,87                     | 7 <sup>kg</sup> ,42 | 4 <sup>kg</sup> ,35           | 35,4 0/0                      | 2.247 <sup>cm</sup> ,33 |
| 2                            | XII     | 35,14                             | 6,96                                    | 5,55                | 4,44                          | 35,5                          | 2.436,96                |
| 3                            | VIII    | 36,28                             | 3,72                                    | 7,75                | 4,07                          | 35,4                          | 2.301,23                |
| 4                            | XXIII   | 36,28                             | 8,23                                    | 7,03                | 5,52                          | 36,2                          | 3.124,63                |
| 5                            | XX      | 36,85                             | 6,40                                    | 8,54                | 6,65                          | 44,5                          | 3.823,54                |
| 6                            | XV      | 38,00                             | 5,91                                    | 7,89                | 5,72                          | 41,5                          | 3.390,81                |
| 7                            | XVIII   | 38,85                             | 6,25                                    | 8,42                | 6,20                          | 42,2                          | 3.757,57                |
| 8                            | V       | 39,43                             | 4,97                                    | 7,26                | 4,27                          | 34,9                          | 2.625,27                |
| 9                            | XIII    | 41,43                             | 5,33                                    | 7,42                | 4,56                          | 35,8                          | 2.947,16                |
| 10                           | VI      | 41,71                             | 5,06                                    | 7,51                | 4,48                          | 35,7                          | 2.916,33                |
| 11                           | XIX     | 42,28                             | 5,76                                    | 6,20                | 4,30                          | 36,0                          | 2.861,19                |
| 12                           | VII     | 42,57                             | 3,04                                    | 8,05                | 4,04                          | 36,4                          | 2.679,10                |
| 13                           | III     | 43,71                             | 5,28                                    | 9,72                | 6,37                          | 42,50                         | 4.317,33                |
| 14                           | XVII    | 45,71                             | 5,00                                    | 8,79                | 6,11                          | 44,30                         | 4.356,89                |
| 15                           | XXI     | 46,00                             | 5,60                                    | 8,24                | 5,75                          | 41,50                         | 4.126,20                |
| 16                           | XXIX    | 48,28                             | 4,95                                    | 7,86                | 5,60                          | 43,70                         | 4.217,74                |
| 17                           | XXII    | 50,00                             | 4,70                                    | 8,17                | 5,94                          | 46,20                         | 4.633,20                |
| 18                           | I       | 51,42                             | 5,60                                    | 8,85                | 6,34                          | 43,90                         | 5.085,64                |
| 19                           | XXVIII  | 53,14                             | 4,03                                    | 7,64                | 5,13                          | 44,00                         | 4.152,68                |
| 20                           | IX      | 54,00                             | 4,43                                    | 7,24                | 5,25                          | 44,9                          | 4.422,60                |
| 21                           | L       | 57,14                             | 6,17                                    | 9,76                | 7,08                          | 44,5                          | 5.273,67                |
| 22                           | XXIV    | 58,00                             | 5,48                                    | 8,87                | 5,68                          | 39,5                          | 5.140,25                |
| 23                           | XXX     | 60,00                             | 4,90                                    | 9,14                | 5,70                          | 40,6                          | 5.336,13                |
| 24                           | XXV     | 63,00                             | 5,10                                    | 8,17                | 6,12                          | 46,1                          | 6.018,35                |
| 25                           | XXVI    | 66,00                             | 4,97                                    | 9,34                | 6,90                          | 48,2                          | 7.109,30                |
| 26                           | II      | 67,00                             | 5,25                                    | 8,92                | 7,45                          | 52,5                          | 7.786,74                |
| 27                           | X       | 70,00                             | 7,08                                    | 8,99                | 8,00                          | 50,0                          | 8.736,00                |
| 28                           | XIV     | 72,00                             | 7,26                                    | 8,80                | 7,55                          | 47,0                          | 8.480,16                |
| 29                           | XI      | 74,00                             | 7,00                                    | 9,15                | 8,11                          | 50,0                          | 9.362,18                |
| 30                           | XVI     | 76,00                             | 6,95                                    | 9,66                | 8,05                          | 50,8                          | 9.544,08                |
| 31                           | XXVII   | 79,00                             | 7,15                                    | 9,82                | 8,01                          | 49,5                          | 9.871,52                |
| 32                           | XXXI    | 70,00                             | 7,09                                    | 8,88                | 7,98                          | 49,9                          | 8.714,16                |
| 33                           | XXXII   | 70,00                             | 7,00                                    | 8,97                | 8,13                          | 50,9                          | 8.877,96                |
| 34                           | XXXIII  | 72,00                             | 7,41                                    | 9,84                | 8,00                          | 46,3                          | 8.985,60                |
| 35                           | XXXIV   | 72,00                             | 7,19                                    | 9,37                | 7,77                          | 46,9                          | 8.727,26                |
| 36                           | XXXV    | 75,00                             | 7,12                                    | 9,45                | 8,10                          | 48,9                          | 9.477,00                |
| 37                           | XXXVI   | 80,00                             | 6,88                                    | 8,90                | 7,45                          | 47,2                          | 9.297,60                |
| 38                           | XXXVII  | 84,00                             | 5,90                                    | 8,42                | 6,01                          | 41,9                          | 7.875,50                |
| 39                           | XXXVIII | 88,00                             | 5,26                                    | 8,00                | 4,48                          | 33,7                          | 6.150,14                |
| 40                           | XXXIX   | 70,00                             | 6,05                                    | 8,65                | 7,78                          | 52,9                          | 8.495,76                |
| 41                           | XL      | 70,00                             | 8,31                                    | 3,59                | 7,81                          | 52,4                          | 8.611,40                |
| 42                           | XLI     | 70,00                             | 6,96                                    | 7,95                | 7,92                          | 53,10                         | 8.648,64                |
| 43                           | XLII    | 70,00                             | 7,71                                    | 7,89                | 8,10                          | 51,9                          | 8.835,20                |
| 44                           | XLIII   | 70,00                             | 7,00                                    | 8,02                | 7,96                          | 53,0                          | 8.692,32                |
| 45                           | XLIV    | 70,00                             | 7,56                                    | 8,37                | 8,35                          | 52,4                          | 9.118,20                |
| 46                           | XLV     | 70,00                             | 7,12                                    | 8,49                | 8,07                          | 51,7                          | 8.812,44                |
| Moy. de ces<br>5 expériences |         | 70,00                             | 7 <sup>kg</sup> ,27                     | 8 <sup>kg</sup> ,14 | 8 <sup>kg</sup> ,08           | 52,4 0/0                      | 8.821 <sup>cm</sup> ,3  |

SUR LAITON (durée 3<sup>m</sup>,50).

| LIMAILLE<br>par<br>HEURE | DEPENSE<br>HORAIRE<br>stricte | COUT<br>du<br>KILOGRAM-<br>MÈTRE | COUT<br>DU GRAMME<br>de<br>limaille | TAUX D'ACCROISSEMENT DES |            | OBSERVATIONS<br><br>DIVERSES |     |   |
|--------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|------------|------------------------------|-----|---|
|                          |                               |                                  |                                     | RESPIRATIONS             | PULSATIONS |                              |     |   |
|                          |                               |                                  |                                     | 12                       | 13         |                              |     |   |
| 8                        | 9                             | 10                               | 11                                  | 12                       | 13         | 14                           |     |   |
| 20 <sup>r</sup> ,57      | 105 <sup>Cal</sup> ,04        | 0 <sup>Cal</sup> ,046            | 5 <sup>Cal</sup> ,40                | 21,4                     | 0/0        | 16,8                         | 0/0 |   |
| 26,57                    | 111,97                        | 0,045                            | 4,21                                | 23,8                     |            | 19,0                         |     | Un peu de fatigue à l'avant-bras. Pas de trace de douleur. Le corps un peu penché, exempt d'oscillations. |
| 27,14                    | 112,13                        | 0,048                            | 4,13                                | 20,6                     |            | 25,1                         |     |   |
| 30,45                    | 110,04                        | 0,035                            | 3,61                                | 34,2                     |            | 31,7                         |     |   |
| 35,53                    | 117,26                        | 0,030                            | 3,30                                | 35,0                     |            | 30,9                         |     |   |
| 31,90                    | 115,28                        | 0,034                            | 3,61                                | 29,7                     |            | 26,1                         |     |   |
| 34,25                    | 127,75                        | 0,032                            | 3,73                                | 33,1                     |            | 24,8                         |     |   |
| 22,28                    | 111,84                        | 0,042                            | 5,01                                | 22,4                     |            | 19,6                         |     |   |
| 25,15                    | 123,78                        | 0,042                            | 4,92                                | 28,8                     |            | 17,4                         |     |   |
| 25,71                    | 124,77                        | 0,042                            | 4,85                                | 28,8                     |            | 22,5                         |     |   |
| 30,68                    | 119,58                        | 0,042                            | 8,89                                | 26,4                     |            | 20,4                         |     |   |
| 31,58                    | 117,83                        | 0,043                            | 3,73                                | 20,9                     |            | 17,3                         |     |   |
| 50,25                    | 138,15                        | 0,032                            | 2,75                                | 35,4                     |            | 26,9                         |     |   |
| 51,14                    | 139,42                        | 0,032                            | 2,72                                | 36,8                     |            | 25,7                         |     |   |
| 48,20                    | 136,16                        | 0,033                            | 2,82                                | 34,9                     |            | 24,8                         |     |   |
| 49,70                    | 139,18                        | 0,033                            | 2,80                                | 35,0                     |            | 26,1                         |     |   |
| 54,04                    | 143,69                        | 0,031                            | 2,66                                | 34,8                     |            | 29,0                         |     |   |
| 56,07                    | 167,82                        | 0,033                            | 2,99                                | 38,9                     |            | 28,9                         |     |   |
| 50,60                    | 137,04                        | 0,033                            | 2,71                                | 33,6                     |            | 24,2                         |     |   |
| 45,57                    | 132,71                        | 0,030                            | 2,91                                | 36,9                     |            | 27,1                         |     |   |
| 48,86                    | 151,48                        | 0,028                            | 3,10                                | 45,2                     |            | 31,7                         |     |   |
| 48,20                    | 149,07                        | 0,029                            | 3,08                                | 45,0                     |            | 29,3                         |     |   |
| 52,93                    | 149,41                        | 0,028                            | 2,82                                | 48,1                     |            | 29,9                         |     |   |
| 57,45                    | 178,80                        | 0,029                            | 3,11                                | 46,9                     |            | 30,7                         |     |   |
| 68,66                    | 213,28                        | 0,030                            | 3,10                                | 51,3                     |            | 30,8                         |     |   |
| 70,25                    | 218,10                        | 0,028                            | 3,10                                | 47,7                     |            | 31,9                         |     |   |
| 80,93                    | 218,50                        | 0,025                            | 2,70                                | 36,1                     |            | 27,7                         |     |   |
| 82,30                    | 228,97                        | 0,027                            | 2,78                                | 39,9                     |            | 32,3                         |     |   |
| 85,75                    | 252,78                        | 0,027                            | 2,94                                | 40,6                     |            | 31,4                         |     |   |
| 89,87                    | 248,14                        | 0,026                            | 2,76                                | 48,2                     |            | 32,2                         |     |   |
| 93,78                    | 256,70                        | 0,026                            | 2,73                                | 48,7                     |            | 31,9                         |     |   |
| 81,25                    | 217,85                        | 0,025                            | 2,68                                | 38,1                     |            | 29,7                         |     |   |
| 82,01                    | 221,95                        | 0,025                            | 2,70                                | 33,9                     |            | 30,1                         |     |   |
| 81,97                    | 233,65                        | 0,026                            | 2,85                                | 37,4                     |            | 21,9                         |     |   |
| 78,64                    | 226,10                        | 0,026                            | 2,87                                | 35,9                     |            | 25,4                         |     |   |
| 86,08                    | 255,90                        | 0,027                            | 2,97                                | 39,3                     |            | 29,9                         |     |   |
| 85,42                    | 251,20                        | 0,027                            | 2,94                                | 43,7                     |            | 35,2                         |     |   |
| 69,18                    | 253,00                        | 0,032                            | 3,80                                | 52,1                     |            | 36,3                         |     |   |
| 49,96                    | 211,47                        | 0,034                            | 4,23                                | 54,7                     |            | 35,9                         |     |   |
| 77,86                    | 204,01                        | 0,024                            | 2,62                                | 30,1                     |            | 21,9                         |     |   |
| 78,40                    | 204,62                        | 0,024                            | 2,61                                | 29,4                     |            | 22,3                         |     |   |
| 78,63                    | 198,93                        | 0,023                            | 2,53                                | 27,9                     |            | 19,4                         |     |   |
| 83,81                    | 212,05                        | 0,024                            | 2,53                                | 25,8                     |            | 20,8                         |     |   |
| 78,71                    | 199,93                        | 0,023                            | 2,54                                | 26,4                     |            | 22,1                         |     |   |
| 80,56                    | 200,60                        | 0,022                            | 2,49                                | 26,9                     |            | 20,9                         |     |   |
| 84,59                    | 211,49                        | 0,024                            | 2,50                                | 25,3                     |            | 21,4                         |     |   |
| 81 <sup>r</sup> ,26      | 204 <sup>Cal</sup> ,60        | 0 <sup>Cal</sup> ,023            | 2 <sup>Cal</sup> ,51                | 26,4                     | 0/0        | 20,9                         | 0/0 |   |

1° *L'influence du rythme.* — A mesure que le nombre de coups de lime par minute augmente, le travail mécanique augmente aussi généralement; il s'ensuit une quantité croissante d'ouvrage effectué, c'est-à-dire de limaille. Cette progression se poursuit tant que le rythme n'a pas dépassé 80 coups de coups de lime par minute; après quoi elle change de sens, le travail diminue. Il est même très difficile de travailler au rythme de 85, et presque impossible à celui de 90, le travail ne durant, par exemple, que deux minutes seulement.

Aux faibles cadences de 33 et 35, la production par heure est de 2.200 à 2.400 kilogrammètres, ou 20 grammes à 26<sup>gr</sup>,50 de limaille. En doublant, c'est-à-dire aux cadences de 66 et 70, cette production a plus que triplé: 7.000 à 8.800 kilogrammètres ou 68 à 81 grammes de limaille.

En examinant les résultats des expériences numérotées 1-39, on remarquera qu'à la plus grande production horaire de l'ouvrage correspond un rythme de 79 par minute.

L'influence du rythme se manifeste dans une meilleure utilisation de la force musculaire. Tout d'abord l'effort des deux bras sur l'étau augmente sensiblement; les muscles développent au lieu de 12, près de 48 kilogrammes ensemble dont les  $\frac{2}{3}$  à peu près sont fournis par le bras gauche. En outre, les composantes utiles de ses efforts, celles qui effectuent le travail proprement dit, vont en augmentant d'intensité, en moyenne de 4 à 8 kilogrammes. Il s'ensuit, car cet accroissement est plus rapide que celui de l'effort musculaire total, une meilleure utilisation de ce dernier. Le *coefficient d'utilité* passe de 35 à 50 0/0. Mais il faut aussi considérer :

2° *L'influence de l'inclinaison des bras.* — Pour un même effort total, le tableau indique des coefficients d'utilité différents dans certains cas; cela tient à ce que l'ouvrier *inclina plus ou moins* les bras sur l'outil. C'est, par exemple, ce qui s'est produit dans les expériences XII et XXIX, où l'effort utile s'est élevé de 4<sup>kg</sup>,4 à 5<sup>kg</sup>,60, et le coefficient d'utilité de 35,5 à 43,70 0/0. Toutefois cette variation de

l'effort utile, chez un même ouvrier, résulte rarement des changements de position des bras. Elle provient de l'accroissement de l'effort total et du rythme du travail.

Pour mieux préciser l'influence des autres variables, telles que les oscillations du corps, la durée et la fréquence des repos, la position des pieds, l'attitude droite ou penchée du tronc, nous n'avons pas de témoignage plus fidèle que celui de la *dépense énergétique* évaluée d'après l'oxygène consommé. Or nous constatons ceci :

3° *La dépense d'énergie par kilogrammètre ou par gramme de limaille diminue à mesure que le rythme augmente* (voir les colonnes 9 et 10). Sa valeur *minimum* s'obtient au rythme de 70 coups de lime par minute; elle est alors de  $0^{\text{Cal}},025$  par kilogrammètre, ou  $2^{\text{Cal}},70$  par gramme de limaille. Ainsi les conditions *économiques* de travail sont : rythme de 70, avec production de 80 à 82 grammes de limaille par heure, et d'environ 8.800 kilogrammètres. Le bras droit fournit un effort musculaire moyen de 7 kilogrammes, le bras gauche de 9 kilogrammes; l'effort utile par coup de lime (aller et retour) atteint 8 kilogrammes, soit un coefficient d'utilité de 50 0/0. Toutefois ces conditions sont encore susceptibles d'amélioration (nos 27 et 32-33).

4° *Influence de l'attitude de l'ouvrier.* — Durant les 39 expériences qui viennent d'être relatées, l'ouvrier se *penchait* légèrement sur l'étai et son buste faisait un angle de  $20^{\circ}$  avec la verticale. Dans les expériences numérotées 40 et 41 (voir XXXIX et XL), le corps fut maintenu droit, *sans raideur*, la position des pieds demeurant comme auparavant. Au rythme économique de 70, on eut une diminution de 4 0/0 en moyenne sur la dépense; le coefficient d'utilité s'accrut de 2 à 3 0/0, mais l'effort utile s'abaissa de 3,5 0/0 de sa valeur. En tout état de cause, la quantité d'ouvrage n'en fut pas amoindrie, et s'effectua avec une plus grande économie. Il est digne de remarque que l'attitude droite et souple du buste produit de la *régularité* dans le travail.

Un autre élément qui augmente la fatigue, et qui était peu sensible sur le sujet A. C., c'est l'oscillation périodique du corps; en se penchant sur l'outil pendant l'aller en

charge, on est obligé de se redresser au retour, afin de ramener la lime en arrière. Ce balancement qui constitue, aux rythmes élevés, un *travail inutile* considérable, dépend en grande partie de la *position des pieds*, de la distance de l'homme à l'étau, de la hauteur de celui-ci par rapport à la taille de l'ouvrier.

Plaçons cet ouvrier à des distances variant de 15 à 30 cen-

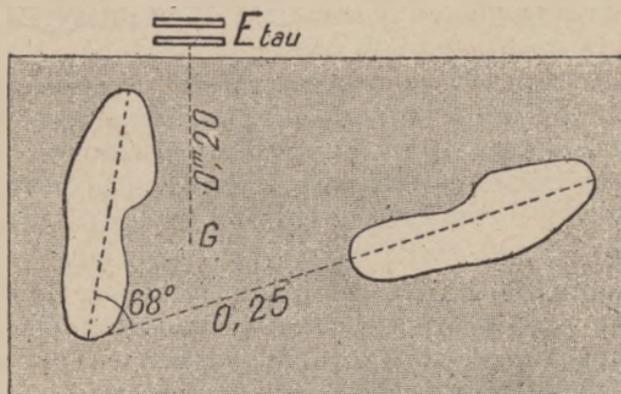


FIG. 298. — Station la plus favorable au travail du limeur.

timètres de l'étau, le niveau de ce dernier correspondant à celui de l'ombilic G (fig. 298) ; les mains sont appuyées sur la lime comme si l'on devait travailler. Dans cet état de repos, la *consommation d'oxygène* en 3<sup>m</sup> 30<sup>s</sup> fut :

|                            |                       |                       |                       |                       |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Distance.....              | 0 <sup>m</sup> ,15    | 0 <sup>m</sup> ,20    | 0 <sup>m</sup> ,25    | 0 <sup>m</sup> ,30    |
| O <sup>2</sup> consommé .. | 1 <sup>lit</sup> ,045 | 1 <sup>lit</sup> ,030 | 1 <sup>lit</sup> ,036 | 1 <sup>lit</sup> ,070 |

La *distance optimum* à l'étau paraît être celle de 0<sup>m</sup>,20, comme l'indique la figure 298.

De même nous avons adopté plusieurs positions différentes des pieds ; la plus économique est donnée par un angle d'ouverture de 68°, et une distance de 0<sup>m</sup>,25 entre les deux talons, du moins pour le sujet A. C. que nous avons étudié. Il faut dire que les ouvriers observent rarement cette station ; ils portent le pied gauche trop en avant et l'écartent peu du pied droit ; si leur buste n'oscille pas, c'est à raison de leur expérience suivant laquelle ils doivent

s'incliner légèrement sur l'étau et conserver cette attitude. Mais il est clair que cette habitude met en jeu des *efforts statiques* appréciables à la longue, pour légers qu'on les suppose. On va voir, d'ailleurs, que nos observations rectifient sur des données précises les habitudes professionnelles.

330. *Mode de travail économique du limeur.* — Après avoir accoutumé l'ouvrier A. C. à tenir le buste parfaitement vertical, et les pieds dans la position de la figure 298, le poids du corps sur la jambe gauche, le manche de la lime dans la main droite, tandis que la paume de la main gauche appuie sur l'extrémité libre, nous avons pris soin que les *retours se fassent sans effort* : un simple glissement sur la pièce à ouvrager. Les expériences 42 à 46 (XLI à XLV) ont établi très nettement que le rythme de 70 coups de lime est alors le *plus économique*, le travail plus régulier, la fatigue moins prononcée, et les efforts mieux répartis ; la respiration est également régulière ; en un mot les conditions mécaniques et physiologiques sont certainement plus favorables à la meilleure production de l'ouvrier. Le kilogramme et le gramme de limaille ne coûtent plus respectivement, que 0<sup>Cal</sup>,023 et 2<sup>Cal</sup>,50 en moyenne. Il resterait à examiner d'autres variables intéressantes : *le poids de la lime, la longueur utilisée* et *la forme* de la surface à limer. La transformation que l'outil a dû subir pour devenir dynamométrique en a porté le poids de 1.000 à 1.850 grammes. D'autre part, le parcours de la lime est de 0<sup>m</sup>,26 ; ces deux circonstances nécessitent un changement de technique que nous avons déjà envisagé, et qui a confirmé ces conclusions générales.

331. *Influences des retours à vide et des intervalles de repos.* — L'étude du rythme des mouvements a établi que l'on travaille économiquement à 70 coups de lime par minute ; c'est à peu près le  $\frac{1}{4}$  du rythme maximum de l'articulation de l'épaule, (§ 94). A chaque coup il y a un aller ou une allée en charge, aussitôt suivi d'un retour à vide ; nous savons que dans ce retour le bras droit dépense encore un effort de 0<sup>kg</sup>,550.

pratiquement négligeable auprès de l'effort total. Le repos n'est donc pas complet dans les retours à vide ; il varie d'ailleurs avec la rapidité des mouvements. En admettant que deux tracés d'efforts sont séparés par un repos, on relève sur les graphiques la répartition exacte des temps par coup de lime. On a trouvé les moyennes suivantes :

| Rythme.     | Coups par minute    |                     |                     |                     |                     |                     |
|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|             | 32                  | 40                  | 44                  | 48                  | 54                  | 70                  |
| Aller . . . | 0 <sup>s</sup> ,722 | 0 <sup>s</sup> ,592 | 0 <sup>s</sup> ,579 | 0 <sup>s</sup> ,510 | 0 <sup>s</sup> ,358 | 0 <sup>s</sup> ,438 |
| Retour . .  | 1,153               | 0,908               | 0,784               | 0,740               | 0,772               | 0,419               |

ou les proportions de :

|             |        |        |        |        |        |        |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Aller . . . | 38 0/0 | 39 0/0 | 42 0/0 | 41 0/0 | 32 0/0 | 51 0/0 |
| Retour . .  | 62 —   | 61 —   | 58 —   | 59 —   | 68 —   | 49 —   |

Malgré l'irrégularité de ces variations, on aperçoit une tendance à l'égalité des deux oscillations dans le travail économique, au rythme de 70.

Les *intervalles de repos complet* sont cependant nécessaires. On a, dans les conditions spécifiées plus haut, exigé un travail continu de 3<sup>m</sup>,30<sup>s</sup>. A la cadence de 70, c'était beaucoup ; la fatigue du bras droit s'accusait par une vive douleur. A la cadence de 54, la fatigue est tellement ralentie qu'elle est pratiquement évitable. L'expérience nous a montré que dans ce dernier cas on doit travailler dix minutes et les faire suivre de deux à trois minutes de repos. La marche optimum, à 70 coups de lime, nécessite des repos de une minute après cinq minutes de travail. En général, le rapport des durées de repos et d'activité est de 1 à 5. Alors on s'assure qu'après une heure de travail l'homme est dans un état normal très voisin de celui du repos : le nombre des respirations ne s'élève que de 20 à 25 0/0, celui des pulsations de 20 0/0 en moyenne. Aucune perturbation d'ailleurs dans les fonctions physiologiques de l'organisme.

L'expérience et l'observation de quelques grandes usines de Paris nous ont appris que l'homme peut fournir *huit heures et demie* de travail à la lime, soit  $\frac{8,50 \times 5}{6} = 7$  heures de

travail effectif et 1<sup>h</sup> 30<sup>m</sup> de repos intercalaires. A raison de 8.800 kilogrammètres par heure, c'est un *travail journalier* de :

$$8.800 \times 7 = 61.600 \text{ kilogrammètres.}$$

avec production de :

$$82 \times 7 = 574 \text{ grammes de limaille.}$$

et une dépense énergétique de :

$$61.600 \times 0^{\text{cal}},023 = 1.417 \text{ Calories environ.}$$

332. TRAVAIL D'UN APPRENTI. — Chez l'apprenti (*fig.* 290) les conditions mécaniques et physiologiques du travail sont défectueuses.

Celui que nous avons examiné, X. P., avait, cependant, deux années d'expériences. L'enregistrement de ses efforts (*fig.* 299) a révélé une trop grande irrégularité d'action, un mouvement rapide et saccadé, suivi d'un arrêt brusque. La fatigue intervient rapidement, et il y a parfois tendance à l'essoufflement. Du reste, dans son ensemble et s'il pouvait être soutenu à cette allure, le travail est considérable: 10.000 à 12.000 kilogrammètres par heure, soit une production de 80 à 85 grammes de limaille. Mais l'effort est inégal, variant du simple au triple et au quadruple; il est précipité: 71 à 79 coups de lime par minute; il s'épuise au bout d'une minute et demie à deux minutes. Et ces irrégularités entraînent des perturbations respiratoires: l'aiguille du spiromètre se déplace par sauts brusques et marque, à certains moments, de véritables arrêts.

Vu l'âge du sujet, seize ans, le rythme adopté dans le travail était certainement élevé; l'effort musculaire des deux bras, égal à 19 ou 20 kilogrammes, était mal réparti et probablement un peu grand. L'impossibilité de le continuer pendant trois minutes et les variations très larges du coefficient d'utilité montrent que l'apprenti n'avait pas été dressé pour travailler dans des conditions économiques. Aussi le prix du gramme de limaille et celui du kilogrammètre sont-

## APPRENTI X. P. — LIME DEMI-DOUCE

| NUMEROS<br>D'ORDRE | COUPS<br>DE LIME<br>par<br>minute | EFFORTS MUSCULAIRES |                      | EFFORT<br>UTILE<br>des 2 bras | COEFFI-<br>CIENT<br>D'UTILITE | TRAVAIL<br>par<br>HEURE  |
|--------------------|-----------------------------------|---------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
|                    |                                   | Bras droit          | Bras gauche          |                               |                               |                          |
| 1                  | 2                                 | 3                   | 4                    | 5                             | 6                             | 7                        |
| 47 XLVI            | 71,42                             | 8 <sup>ks</sup> ,05 | 10 <sup>ks</sup> ,90 | 10 <sup>ks</sup> ,41          | 51,9 0/0                      | 11.598 <sup>ksm</sup> ,3 |
| 48 XLVII           | 73,39                             | 7,62                | 11,00                | 10,85                         | 58,2                          | 12.422                   |
| 49 XLVIII          | 75,10                             | 8,20                | 10,45                | 9,37                          | 50,2                          | 9.897,5                  |
| 50 XLIX            | 76,20                             | 7,40                | 12,53                | 8,95                          | 45,5                          | 10.530,6                 |
| 51 LI              | 78,00                             | 8,20                | 11,45                | 9,67                          | 49,2                          | 11.766,4                 |
| 52 LII             | 78,90                             | 7,81                | 10,40                | 9,04                          | 50,4                          | 11.126,8                 |
| Moyennes.          | 75,5                              | 7,83                | 11,07                | 9,71                          | 51,6                          | 11.223,6                 |
| 53 LIII            | 70,00                             | 8,45                | 10,85                | 9,80                          | 50,7                          | 10.702,8                 |
| 54 LIV             | 70,00                             | 8,90                | 10,40                | 9,15                          | 47,4                          | 9.991,8                  |
| 55 LV              | 70,00                             | 8,85                | 10,20                | 8,98                          | 47,1                          | 9.806,2                  |
| 56 LVI             | 70,00                             | 9,40                | 9,85                 | 8,85                          | 46,8                          | 9.696,9                  |
| 57 LVII            | 70,00                             | 8,74                | 10,49                | 9,34                          | 48,5                          | 10.199,2                 |
| Moyennes.          | 70,00                             | 8 <sup>ks</sup> ,81 | 10 <sup>ks</sup> ,36 | 9 <sup>ks</sup> ,23           | 48,1 0/0                      | 10.079 <sup>ksm</sup> ,4 |

ils respectivement de 4<sup>Cal</sup>,90 et 0<sup>Cal</sup>,035 en moyenne, au lieu de 2<sup>Cal</sup>,50 et 0<sup>Cal</sup>,025 (Tableau).

Il ne nous était pas possible de suivre sur ce sujet les progrès d'une instruction professionnelle semblable à celle de l'ouvrier A. C., et soumise aux lois du travail économique. Mais nous avons entraîné notre apprenti à différentes reprises au travail ainsi compris : attitude du corps bien droite au lieu de celle tout à fait inclinée qu'il se donnait ; position des pieds conforme à la figure 298 ; rythme de 70 coups de lime.

En peu de temps, cette technique lui permit de mieux répartir son effort et de se rapprocher des conditions de travail du bon ouvrier. Le coût du gramme de limaille et celui du kilogrammètre s'abaissèrent à 4<sup>Cal</sup>,12 et 0<sup>Cal</sup>,030 en moyenne, soit une économie très notable de 16 0/0 environ. Il est vraisemblable que l'apprentissage eût été rapide si l'on

SUR LAITON (durée 2 minutes.)

| LIMAILLE<br>par<br>HEURE | COUT<br>du<br>KILOGRAM-<br>MÈTRE | COUT<br>du<br>GRAMME | ACCROISSEMENT DES |            | OBSERVATIONS<br><br>DIVERSES   |
|--------------------------|----------------------------------|----------------------|-------------------|------------|--|
|                          |                                  |                      | RESPIRATIONS      | PULSATIONS |  |
| 8                        | 9                                | 10                   | 11                | 12         |  |
| 80 <sup>er</sup> ,60     | 0Cal,034                         | 4Cal,89              | 46,2 0/0          | 31,4 0/0   | Balancements accentues<br>du corps; attitude<br>penchee; fatigue et<br>tendance a l'essouf-<br>lement. |
| 85 ,42                   | 0 ,032                           | 4 ,67                | 49,8              | 32,2       |  |
| 72 ,27                   | 0 ,036                           | 4 ,93                | 53,0              | 35,1       |  |
| 81 ,17                   | 0 ,038                           | 4 ,93                | 51,9              | 30,8       |  |
| 84 ,05                   | 0 ,035                           | 4 ,90                | 65,1              | 42,0       |  |
| 79 ,50                   | 0 ,035                           | 4 ,91                | 59,9              | 40,0       |  |
| 80 ,45                   | 0 ,035                           | 4 ,87                | 54,3              | 35,2       |  |
| 77 ,36                   | 0 ,030                           | 4 ,15                | 36,6              | 20,1       | Legers balancements du<br>corps, mais fatigue<br>moins prononcee, et<br>respiration reguliere.         |
| 74 ,63                   | 0 ,031                           | 4 ,15                | 30,9              | 17,9       |  |
| 72 ,89                   | 0 ,031                           | 4 ,17                | 24,8              | 16,8       |  |
| 70 ,10                   | 0 ,030                           | 4 ,15                | 37,9              | 22,3       |  |
| 74 ,44                   | 0 ,030                           | 4 ,11                | 45,0              | 27,7       |  |
| 73 <sup>er</sup> ,88     | 0Cal,030                         | 4Cal,14              | 35,0 0/0          | 21,0 0/0   |  |

avait fait surveiller régulièrement le travail du jeune ouvrier, et rectifier ses mouvements et ses attitudes. On eut diminué considérablement sa fatigue: par exemple, le nombre de ses respirations et celui de ses pulsations se seraient accrus de 30 et 20 0/0 tout au plus dans une période de travail de deux à trois minutes; tandis que, laissé à sa routine, il voit s'élever ce rythme des fonctions de la vie de 54 et 35 0/0 respectivement, par rapport à l'état de repos. Et nous avons reconnu que, dans ces conditions, il lui était difficile de travailler plus de 115 secondes sans arrêt, à peine deux minutes. En enquêtant sur le travail des apprentis, nous nous sommes assuré qu'il est coupé de nombreuses, de trop fréquentes interruptions; chaque période est de 20 à 50 secondes suivant les sujets, en considérant toujours le cas d'une lime plate demi-douce. Les repos sont de 10 à 15 secondes. Si

nous admettons un rapport de  $\frac{1}{3}$  entre la durée d'une pause

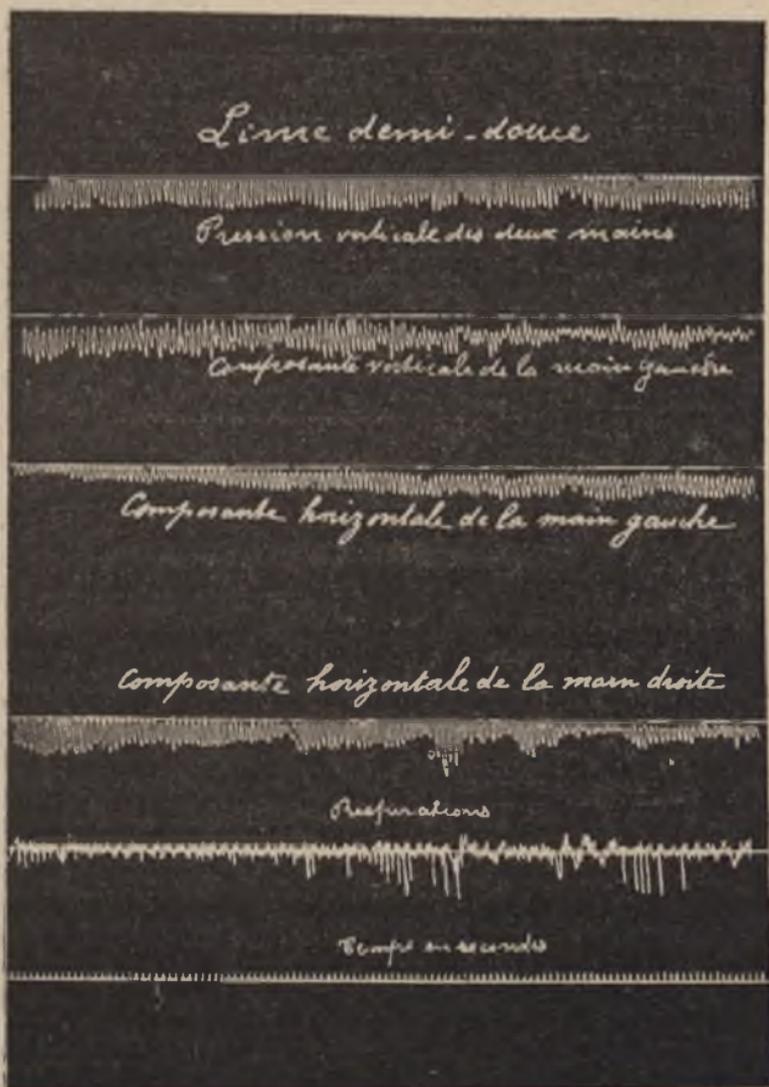


FIG. 299. — Graphique des efforts et de la respiration d'un apprenti limeur.

et celle du travail effectif, et si, comme nous le savons, le travail journalier est de 8<sup>h</sup>50, on arrive à ce résultat que les

apprentis travaillent effectivement 6 heures. Même en acceptant les fortes moyennes du sujet X. P., cela représente :

$$\begin{aligned} 11.222 \times 6 &= 67.332 \text{ kilogrammètres par jour,} \\ 80,45 \times 6 &= 482^{\text{sr}},70 \text{ de limaille,} \end{aligned}$$

et une dépense énergétique de :

$$482,70 \times 4^{\text{Cal}},87 = 2.356^{\text{Cal}},75.$$

Somme toute, une quantité d'ouvrage inférieure à celle du bon ouvrier d'environ 15 0/0, mais un travail mécanique et musculaire plus important et une dépense d'énergie supérieure de 66 0/0.

Il est superflu de faire remarquer que ces conditions d'activité, contraires aux lois scientifiques, ne sont favorables ni à la santé des travailleurs ni au progrès de l'industrie qui les emploie.

L'apprentissage gagnerait à en faire connaître, par des *films cinématographiques*, tout le désavantage, et à leur opposer la vue d'une méthode rationnelle de travail<sup>(1)</sup>.

**333: Variations individuelles.** — Toutes les étapes de l'apprentissage correspondent à des méthodes différentes de travail; le même ouvrier, à mesure que son expérience s'enrichit, améliore ses attitudes, acquiert de l'habileté, c'est-à-dire qu'il diminue, à production égale, sa dépense d'énergie. On peut dire que l'habileté se révèle principalement dans le choix d'un rythme rapide. Les nombreux graphiques que nous avons pu rassembler sont décisifs sur ce point.

Mais ces graphiques montrent aussi que, pour un rythme déterminé, la grandeur et la répartition des efforts diffèrent d'un sujet à un autre, et que, généralement, les oscillations propres du corps, la position des pieds en sont la cause. Toutes choses égales, cependant, les *éléments* du coup de lime sont variables : tel ouvrier pousse l'outil beaucoup plus avec la main gauche qu'avec la main droite, tel autre à égalité, un troisième appuie presque exclusivement du bras

(1) On a montré tous les détails de cette solution dans *Organisation physiologique* (chap. VIII).

gauche et ne lui fait produire qu'une traction négligeable. Nous n'avons pas eu de sujets *gauchers* à notre disposition, mais nous sommes très porté à croire qu'ils appliquent leur effort plus symétriquement que les droitiers.

Les *atrophies musculaires*, les *paralysies* se traduisent par un excès de fatigue dû à une asymétrie plus ou moins prononcée des efforts. Par exemple, le sujet E. A., qui n'a presque pas l'usage du bras droit, fournit un graphique où la composante horizontale de l'effort de ce bras est d'amplitude insignifiante, tandis que celle du bras gauche équivaut à 6 ou 8 kilogrammes. Et ainsi des composantes verticales. Malgré cela, les tracés sont réguliers, E. A. ayant longtemps manié la lime. Chez les *myopes*, un défaut constant, c'est leur attitude penchée sur l'ouvrage, de laquelle résulte un excès de fatigue.

Les effets sur le travail de conditions pathologiques, de mutilations, et la manière d'en déduire la valeur d'une invalidité, ont été approfondis dans notre ouvrage ci-dessus mentionné (1).

A tous ces renseignements, il faut ajouter celui de l'inégalité d'action d'un même groupe musculaire ou l'irrégularité des ordonnées représentatives d'un certain effort. Elle est l'indice d'un mauvais travail, d'une absence de régime normal dans le jeu du moteur vivant. Et cela est le plus grave des défauts, car au mauvais rendement de l'ouvrier se superpose une dépréciation de l'organisme incapable de réparer une usure profonde. Comme nous l'avons dit au cours de ces explications, ce sont les échanges respiratoires et la liberté, la souplesse des mouvements qu'il convient de surveiller avec soin. Il ne faut donc pas hésiter à les favoriser en plaçant les hommes dans des usines organisées sur les bases décrites précédemment.

**334. Conclusions générales.** — Les données de l'expérimentation scientifique, et non la théorie, permettent de répondre à la question fondamentale de l'industrie : déter-

(1) Voir aussi J. Amar, *Le prix du mouvement chez les invalides et les nouveaux gauchers* (C. R. Ac. Sc., 1917, n° du 28 avril).

miner les conditions de travail journalier maximum, en tenant compte des variables physiques et physiologiques. Celles que nous venons de définir s'appliquent au cas d'un outil de forme, de poids, de longueur parfaitement spécifiés; elles s'appliquent probablement aussi aux limes de mêmes dimensions dont les *tailles* sont plus rudes et plus profondes. Mais elles ne sauraient convenir au cas des petites limes qui exigent des mouvements très rapides: 150 en moyenne, avec un *triangle trois-quarts*, long de 17 centimètres.

Avec la *lime plate rectangulaire* de 34 centimètres, utilisant 0<sup>m</sup>,26 à chaque coup, le travail journalier atteint 65.000 kilogrammètres environ en huit heures et demie, dont sept pour la durée effective; l'ouvrage correspondant est de 600 grammes de limaille de laiton *tout au plus*; la dépense d'énergie est de 0<sup>Cal</sup>,023 par kilogrammètre, soit un *rendement net* de :

$$\frac{0,022 \times 425}{1 \text{ kgm}} = 12,3 \text{ 0/0.}$$

Un si faible rendement montre que la manœuvre de la lime est impropre à la bonne utilisation des forces musculaires.

Le corps de l'ouvrier doit être vertical et sans raideur, distant de 0<sup>m</sup>,20 de l'étau, et ce dernier au niveau de l'ombilic, la position des pieds telle que leur angle d'ouverture soit de 68°, et la distance des talons de 0<sup>m</sup>,25; le bras gauche en complète extension et appuyant sur l'outil un peu plus que le bras droit : 8<sup>kg</sup>,50 et 7<sup>kg</sup>,50 avec un effort utile de 8 kilogrammes. Les retours de la lime doivent consister en un simple glissement, sans appui des bras. Enfin, le rythme des mouvements s'élève à 70 par minute.

Toutes ces conditions étant remplies, on fera suivre un travail de *cinq minutes de une minute de repos complet*, les bras tombant le long du corps. Respirations et pulsations ne subissent alors qu'un accroissement moyen de 25 et de 20 0/0 par période, comparativement à l'état de repos. La fatigue locale de l'avant-bras droit est supportable, et la fatigue générale se laisse voir à peine.

Le travail maximum est au moins *double* du travail habituel de la grande majorité des ouvriers.

La régularité des tracés, c'est-à-dire de l'action musculaire, a également été signalée par Imbert <sup>(1)</sup> chez les bons ouvriers; on observe, au contraire, de l'inégalité, des *accidents* dans le travail des débutants et des apprentis.

**335. Manœuvre de la scie.** — Les scies servent pour métal, bois ou pierre. Il n'a pas été fait d'expériences à ce sujet; mais l'observation des ateliers a permis de reconnaître que le scieur développe un effort de 3 à 6 kilogrammes, et adopte une vitesse de 0<sup>m</sup>,30 à 0<sup>m</sup>,60 par seconde. Les variables à considérer dans ce travail sont au moins aussi nombreuses que dans le cas du limeur. L'action journalière varie entre 30.000 et 100.000 kilogrammètres pendant sept heures effectives. Quelques observateurs ont cependant noté que le *scieur de long* produit un travail journalier de 160.000 kilogrammètres (Poncelet), et que ce travail demande une régularité de marche et une vitesse modérée. Les scieurs de long travaillent par équipe de deux; l'effort est de 15 kilogrammes à l'aller, 1<sup>kg</sup>,80, dans les relevées; le parcours est de 0<sup>m</sup>,45, et le rythme de 80 coups par minute. Le travail journalier est donc, en huit heures :

$$(15 + 1,8) 0,45 \times 80 \times 60 \times 8 = 290.304 \text{ kilogrammètres,}$$

soit : 145.152 kilogrammètres par homme (Amar). La fatigue est grande par suite de la station courbée, agenouillée, etc.

**336. Travail du mécanicien.** — Les facteurs externes qui augmentent le travail ouvrier (outillage, vitesse) ont été soigneusement étudiés par Taylor dans l'art métallurgique; ce savant examine la profondeur de *coupe des métaux* aux diverses vitesses réglées par le changement des transmissions, et distingue les formes d'outils le plus propres à accroître le rendement. Suivant ces données, il constate que le rendement « s'élève de 2 fois et demie dans le cas le plus défavorable, de 9 fois dans le meilleur ». Il va de soi que ces résultats exigent une certaine instruction de l'homme et la connaissance parfaite de la *taille des métaux*: vitesse de marche des outils, avance à adopter.

(1) A. Imbert (*Comptes Rendus Acad. Sc.*, 10 juillet 1911, p. 128 *Rev. gén. des Sc.*, 1911, p. 485).

Les expériences de Taylor ont consisté à chronométrer le mouvement des outils, à varier la forme de ces derniers, à choisir telle ou telle avance, à connaître les propriétés du métal à ouvrager, etc., et, en se basant sur ces *variables mécaniques*, à calculer les valeurs du meilleur rendement<sup>(1)</sup>. Des *règles à calcul* spéciales furent établies, dans ce but, par Carl Barth<sup>(2)</sup>. La conséquence de cette transformation des méthodes de travail fut un essor prodigieux dans la vie économique des usines américaines.

Le *travail au tour* est également redevable du choix de l'outillage et de l'adresse des ouvriers : il s'agit de déterminer l'avance, de régler l'action de la machine suivant l'épaisseur du copeau à enlever et la nature du métal (fonte, fer forgé, acier). La force et la vitesse demandent, ici particulièrement, à être admirablement combinées. On n'oubliera jamais que, dans toutes ces circonstances, les lois physiologiques doivent être respectées scrupuleusement, et plus que ne l'a fait, semble-t-il, Taylor lui-même. Cet éminent savant, préoccupé avant tout du point de vue industriel, mit vingt-six ans à résoudre le problème de l'emploi économique de l'outillage le plus perfectionné. Dans tout atelier de mécanique, dit-il, qu'il s'agisse de conduire une machine à tourner, à percer ou à fraiser, il y a 12 *variables du travail* : 1° Qualité du métal à ouvrager ; 2° Diamètre de la pièce ; 3° Profondeur de coupe ; 4° Épaisseur du copeau ; 5° Élasticité de la pièce et de l'outil ; 6° Profil du tranchant ; 7° Composition chimique de l'acier ; 8° Réfrigération ; 9° Durée de la coupe ; 10° Pression du copeau sur l'outil ; 11° Vitesses et avances ; 12° Effort de traction du tour.

On établit, d'après un grand nombre d'expériences, des relations numériques, des formules, qui se résolvent au moyen des règles à calcul. Et c'est aussi l'expérience, malheureusement insuffisante, qui a indiqué à l'auteur ce qu'il pouvait demander à ses ouvriers sans les surmener.

Il n'en est pas moins vrai que les règles de travail établies

(1) Taylor (*Trans. on the Amer. Soc. of mech. Engin.*, t. XXVIII, 1906).

(2) Carl Barth (*Trans. on the Amer. Soc. of Mech. Engineers*, t. XXV, 1903).

par Taylor sont de nature à augmenter dans une notable proportion le rendement des hommes, celui des ouvriers des arsenaux, de l'artillerie, pourvu qu'ils soient conduits avec tact et mesure, et pourvu qu'ils y trouvent leur profit (voir § 365).

L'exemple du travail du *limeur* définit la méthode à laquelle nous nous sommes arrêté, pour ses avantages quant à la production, et à la lutte contre le surmenage. Nous l'appliquons, en ce moment, à l'étude du *forgeage* et du *tour*.

Mais les données expérimentales ci-dessus, relatives à la lime et au marteau, sont une partie importante de l'organisation d'un atelier de mécanique.

Ajoutons que l'enclume sera toujours en bon état, sans accidents à la surface ; son poids égalera, y compris la *chabotte* (1), neuf fois le poids du marteau à forger le fer, et douze à treize fois celui à travailler l'acier ; ce sont les limites inférieures.

Bien entendu, l'ouvrier disposera des meilleurs outils, notamment d'un tour-revolver perfectionné. Et la division du travail sera telle que le tourneur n'aura pas à s'inquiéter de son voisin, qui sera ajusteur, ou perceur, ou forgeron.

L'emploi d'*équipes* de 7 heures effectives, soit 8 heures et demie en tout pour chacune, m'a paru la solution la plus favorable aux grands rendements ; il ménage la santé en intercalant les repos nécessaires. L'exécution de l'ouvrage doit être facilitée, hâtée, précisée, grâce à des instructions claires et détaillées émanant du bureau technique.

Dans la plupart de ces travaux où un grand effort et une attention puissante sont nécessaires, il n'y a point de place pour la *main-d'œuvre féminine*. Elle est plus indiquée pour les occupations de *bureaux*. Sous le rapport du travail, le Féminisme est la sauvegarde de la mère et des enfants.

(1) La chabotte est le socle de l'enclume ; elle absorbe les trépidations ; il convient qu'elle ait une grande masse, en moyenne dix fois celle du marteau courant.

## CHAPITRE IV

### LE TRAVAIL PROFESSIONNEL (Suite)

337. Travail au sécateur. — Imbert (1) a mesuré l'effort nécessaire pour couper en boutures les sarments de vigne au moyen du sécateur manœuvré par une seule main ; ce travail, dans le Midi, est fait par des femmes. Il a obtenu, au moyen du dispositif déjà décrit, les résultats suivants :

|                          |                     |                    |                     |                      |
|--------------------------|---------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| Épaisseur du sarment...  | 3 <sup>mm</sup> ,50 | 4 <sup>mm</sup> ,0 | 6 <sup>mm</sup> ,75 | 10 <sup>mm</sup> ,50 |
| Effort en kilogrammes... | 2 <sup>kg</sup> ,00 | 3 <sup>kg</sup> ,4 | 4 <sup>kg</sup> ,4  | 13 <sup>kg</sup> ,0  |

Or, une bonne ouvrière fait, en moyenne, 3.000 boutures ; c'est une dépense de forces musculaires évaluée à 27.138 kilogrammes au moins ; la dépense d'énergie n'a pas été déterminée, l'erreur de l'auteur ayant toujours consisté à confondre effort et travail.

Le rendement des ouvrières peut varier du simple au double, non seulement par suite de la différence d'épaisseur des sarments, mais de l'habileté professionnelle qui entraîne une économie de temps ; l'ouvrière habile place les sarments à portée de sa main pour n'avoir pas à se baisser ni à faire des mouvements de grande amplitude ; l'outil et l'ouvrage sont disposés de telle façon que le sécateur n'interrompt son action que le temps strictement nécessaire au déplacement du sarment ; le graphique des efforts est, dans ce cas, tout à fait régulier ; chez une débutante, il révèle un travail saccadé, irrégulier et très dispendieux.

338. Travail du bois. — L'emploi des outils de menuisier, de tourneur sur bois n'a donné lieu à aucune recherche

(1) A. Imbert (*Revue générale des Sciences*, juin 1911, p. 481 ; *Revue d'Hygiène*, 1909, p. 749).

encore. L'étude scientifique des machines-outils, telles que la raboteuse, la perceuse, est également dans l'oubli le plus complet ; il semble que de ce côté-là l'intérêt ait paru moins grand. Et pourtant, outre l'avantage d'une production plus intense, l'organisation méthodique de ce travail permettrait peut-être de réduire la durée du séjour dans les ateliers où, très souvent, le bois employé donne des vapeurs toxiques. (§ 193). On a signalé, dans *Organisation* (p. 71 et 135), la *Varlope inscrivante*. C'est un outil qui permet d'enregistrer l'effort total du bras sur le manche, et la pression sur le bois à raboter.

La varlope, servant également à l'éducation des mouvements et à l'apprentissage, dont ce n'est pas ici l'objet propre, on ne la décrira pas. Mais nous tenons à dire qu'elle montre que l'effort sur le manche est de 25 kilogrammes, et sur la planche de 12 kilogrammes, en moyenne. De sorte que la résistance que le bois oppose au fer s'élève à près de 22 kilogrammes. Ce genre de travail est donc relativement fatigant.

Le sciage et rabotage du bois, de même que le tournage doivent être effectués *mécaniquement* ; et ils le sont généralement.

Nous avons étudié plus particulièrement, de 1915 à 1919, l'utilisation du bois de sapin, tilleul, en *orthopedie*, pour la fabrication des membres artificiels. Cette question est longuement traitée dans l'ouvrage ci-dessus. On dira seulement que cette spécialité veut une organisation vraiment scientifique, qui livre en série des pièces parfaitement taillées et creusées, qu'il ne s'agira plus que de réunir, adapter au blessé, puis finir.

Ce travail est bien conçu dans les usines orthopédiques des Etats-Unis et d'Allemagne, moins en Angleterre et en France.

Toutefois, l'ébénisterie française, si fine et si élégante, comporte une certaine liberté qui met en valeur l'ingéniosité, le goût du Parisien.

### 339. Travail de polissage des glaces. — Amontons<sup>(1)</sup> eut

(1) Amontons (*Mémoires Acad. Roy. Sc.*, 1699, p. 112).

l'idée d'évaluer la quantité de travail journalier des ouvriers polisseurs. Ceux-ci déplacent une sorte d'arc en bois « de un pied et demi en une demi-seconde, ce qui équivaut à l'élévation continue d'un fardeau de 25 livres à 3 pieds par seconde ». Cet éminent physicien fit les mesures nécessaires en se servant d'un peson, et, d'après ses données, nous calculons que l'ouvrier polisseur travaille avec un effort de 12<sup>kg</sup>,24 et une vitesse de 0<sup>m</sup>,97 pendant dix heures effectives ; soit une production journalière de 205.109 kilogrammètres. C'était assurément un maximum.

**340. Travail à la pelle.** — Avant de traiter ce sujet d'après les anciens expérimentateurs et nos propres recherches plus particulièrement consacrées au *travail agricole* (1), voyons ce qu'en dit Taylor : « Il semble, à première vue, qu'il suffit de quinze à vingt heures de réflexion pour découvrir les principes essentiels de cette science (le travail à la pelle). Cependant cette question a été jusqu'à présent tellement dominée par des considérations empiriques que l'auteur n'a jamais rencontré un seul entrepreneur de terrassements qui ait eu l'idée qu'il pût exister une science du travail à la pelle.

« Il existe, pour un pelleteur, une charge déterminée, correspondant à son rendement maximum... En choisissant deux ou trois pelleteurs, leur payant une prime pour qu'ils travaillent consciencieusement, faisant varier graduellement la charge de la pelle, et faisant observer pendant plusieurs semaines, par des expérimentateurs exercés, toutes les conditions accessoires du travail, on découvrit que le bon ouvrier pelleteur obtient son rendement maximum avec une charge d'environ 10<sup>kg</sup>,250.

« Pour déterminer quelques-uns des autres éléments qui constituent la science du travail à la pelle, on fit des milliers d'observations au compteur à secondes, afin d'étudier avec quelle vitesse l'ouvrier, muni du type de pelle approprié, peut enfoncer son outil dans le tas et le retirer convenablement chargé. Ces observations furent faites d'abord en

(1) Notre modèle de *Pelle dynamographique* est décrit dans *Organisation...* (p. 71), où nous traitons du *travail agricole*.

poussant la pelle dans le tas sur un sol irrégulier, puis sur un sol en planche, puis sur un sol en tôle. On fit de même une étude précise pour déterminer le temps nécessaire pour renverser la pelle, pour lancer la charge à une distance horizontale donnée, à une hauteur donnée, en combinant diversément distance et hauteur. » (*Loc. cit.*)

Ailleurs, dans un discours prononcé le 3 mars 1915, c'est-à-dire dix-huit jours avant sa mort, Taylor explique encore :

« Nous commençâmes par faire manier des pelletées de 17 à 17<sup>kg</sup>,500, et nous évaluâmes la masse totale de matériel déplacé. Le lendemain, l'opération recommença avec une pelle plus petite, ne pouvant tenir plus de 15<sup>kg</sup>,4, et nous constatâmes que la masse du matériel remuée était *plus grande* que la veille. On réduisit la charge de la pelle successivement à 13<sup>kg</sup>,5, puis à 12 kilogrammes, et chaque fois le rendement augmentait. Il atteignit un *maximum* quand la charge de la pelle était de 9<sup>kg</sup>,75... Voilà un fait scientifique. Un bon travailleur à la pelle doit donc remuer des pelletées de 9<sup>kg</sup>,75 chacune pour donner un rendement maximum.

« Nous fîmes édifier un atelier contenant dix à quinze espèces de pelles différentes, de façon que, pour chaque sorte de matériel — charbon, coke, cendres, minerais, etc., — on eût une pelle pouvant tenir 9<sup>kg</sup>,75 de matière. Ce poids représente naturellement une moyenne... (La pelle de 10<sup>kg</sup>,25 est un cas particulier, pour le minerai).

« La pelle doit toujours être appuyée, et glisser sur un soubassement dur... Et l'expert dira à l'ouvrier qu'il n'y a qu'une seule façon de travailler bien : c'est de faire descendre l'avant-bras à la hauteur de la partie supérieure de la jambe, et de pousser la pelle en avant avec tout le poids du corps. De cette façon le bras ne travaille presque pas, et le corps lance automatiquement tout son poids, qui équivaut à une poussée d'environ 35 kilogrammes <sup>(1)</sup>. »

Ces expériences si intéressantes, de l'ingénieur américain, supposent évidemment que la comparaison des résul-

(1) *Bulletin of The Taylor Society*, decembre 1916, t. II, n° 5.

tats a un fondement dans l'égalité de fatigue. On ne pourrait dire, en effet, que telle pelletée accroît le rendement si l'on ne certifie pas qu'elle n'accroît pas la fatigue dans la même proportion, mais, tandis que la mesure de l'oxygène consommé et les indices respiratoires nous fournissent, à nous, cette base scientifique, on la cherche vainement chez Taylor. Ou plutôt, la voici : « Il faut, dit-il aux ouvriers, qu'à la fin du jour vous ne vous sentiez pas exténués, mais que vous soyez néanmoins contents de vous reposer. Nous voulons une journée de bon travail, ni laisser-aller, ni surmenage. Des que vous sentez que vous allez dépasser la limite de votre endurance, ralentissez... » (*Loc. cit.*, p. 579).

Ce critérium, fait de confiance et d'à peu près, ne suffit pas à la science. Et là, vraiment, est le caractère incomplet, empirique du Taylorisme.

**341. Recherches de Coulomb.** — Venons-en maintenant, aux évaluations du travail à la pelle. Coulomb en donne une relative au *labour*. Le sujet qu'il étudia élevait journellement  $45^{\text{m}^3},250$  de terre; il prenait, avec une pelle pesant  $1^{\text{kg}},700$ , des pelletées de 6 kilogrammes; c'est un poids de  $7^{\text{kg}},700$ , inférieur à celui qu'indique Taylor. Le mètre cube de terre pèse, en moyenne, 1.898 kilogrammes. Ainsi le nombre de pelletées sera :

$$\frac{45,250 \times 1.898}{6}$$

Comme l'ouvrier élevait la pelle à une hauteur de  $0^{\text{m}},40$ , le travail dû au pelletage sera pour les ascensions seules :

$$\frac{45,250 \times 1.898}{6} \times 7,700 \times 0,40 = 43.000 \text{ kilogrammètres.}$$

Il enfonçait la pelle dans le sol à une profondeur de  $0^{\text{m}},25$ , et un peson a permis d'évaluer à 15 kilogrammes la résistance ainsi vaincue. C'est encore là un travail de :

$$\frac{45,250 \times 1.898}{6} \times 15 \times 0,25 = 53.600 \text{ kilogrammètres.}$$

Coulomb admet donc un travail total de 100.000 kilogrammètres par jour environ ; c'est une valeur assez faible (1).

Dans les travaux de *terrassements*, la pelle est faiblement chargée, 1<sup>kg</sup>,50 à 2 kilogrammes, et on la porte à 1<sup>m</sup>,60 de hauteur à peu près, pour charger des tombereaux, ou pour jeter la terre verticalement. Le travail dure dix heures et on enlève de 15 à 20 mètres cubes de terre. Prenons les chiffres les plus forts. Le nombre des pelletées sera :

$$\frac{20 \times 1.898}{2} = 18.980.$$

Et le travail effectué :

$$18.980 \times 1,60 \times 3,7 = 112.362 \text{ kilogrammètres,}$$

en prenant 1<sup>kg</sup>,700 pour poids de la pelle. Malgré la longue durée du travail, il est loin d'être un maximum, attendu la charge peu considérable enlevée à chaque pelletée. Le pelleteur fatigue beaucoup des bras et des reins à cause des mouvements qu'il se donne et des balancements renouvelés du buste.

Ce travail musculaire est donc très élevé. D'ailleurs, l'homme doit se déplacer et mettre en activité, quelque peu, les muscles des membres inférieurs.

**342. Observations analytiques.** — Nous avons complété ces évaluations par des analyses plus précises sur le chantier, à propos des terrassements, et du *pelletage* en particulier (chantiers de la rue de l'Odéon et de l'avenue d'Antin, en mai-juillet 1914).

Le sable est mis en tas à l'air libre. L'ouvrier charge la brouette en se servant d'une pelle 6 *points*, ayant 0<sup>m</sup>,36 de diamètre et 0<sup>m</sup>,32 de long. Le chargement exige dix à onze pelletées de 10 kilogrammes chacune, à raison de 4,3 secondes par pelletée. Ainsi, une brouette de 71 litres se trouvait prête en 2 minutes environ, vu que l'ouvrier se reposait 1 minute après sept pelletées successives.

(1) En y ajoutant les retours à vide, on aura un ensemble de 116.000 kilogrammètres environ.

Contrôlant la fatigue, dans ce genre de travail, j'ai pu faire charger la brouette d'un trait, à raison de 2,5 secondes seulement la pelletée, et 1 minute de repos par brouettée. Dans ce but, le travailleur, choisi de préférence parmi les grandes tailles, exécute ce *pelletage horizontal* en tenant son outil incliné sur l'axe vertical du corps d'environ  $110^\circ$  (mesurés sur instantanés); le manche coupe



FIG. 300. — Manœuvre rationnelle du pelletage (J. Amar).

cet axe à hauteur de la ceinture. Le bras le plus fort, généralement le gauche (ces terrassiers comptant de nombreux gauchers et ambidextres), est du côté du fer, et s'écarte peu du corps, la main à  $0^m,60$  du bout du manche; l'autre bras appuie sur ce bout comme par un jeu de levier (*fig. 300*).

En disposant une planche dure et élastique sous les pieds de l'ouvrier, et dans le cas d'un adulte fort, on arrive à

charger deux brouettes à la suite, ne prenant de repos qu'après; il sera de 90 secondes. En moyenne, le bon rendement est assuré par le travail d'une équipe où deux chargeurs disposent de quatre brouetteurs. Alors on compte 20 pelletées en 50 secondes et 90 secondes de repos, 12 brouettes donnant droit à 6 minutes de repos complet, assis ou couché, soient 36 brouettes à l'heure. En 8 heures, temps qu'il ne

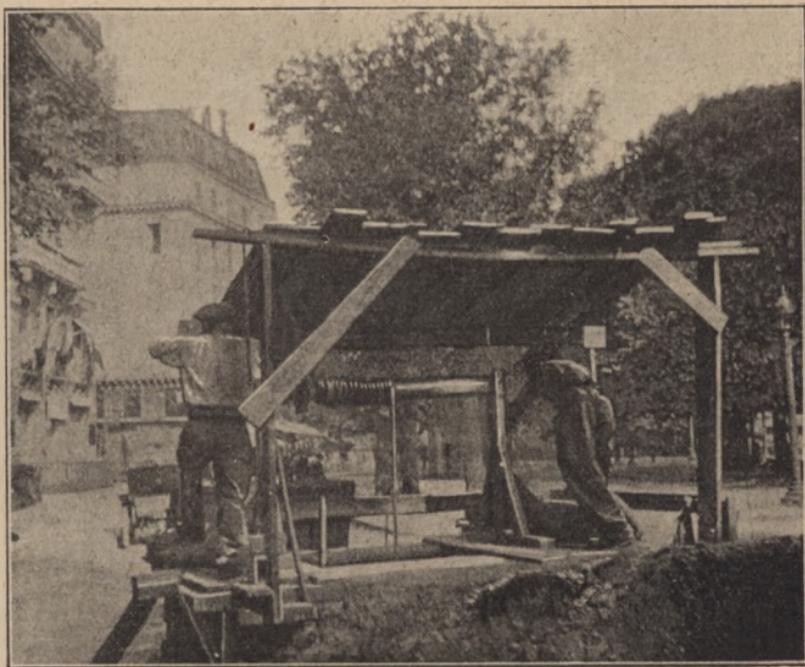


FIG. 301. — Puisage de la terre au moyen du treuil (J. Amar).

faut pas dépasser, le chargement total sera de 20 à 21 mètres cubes de sable. Et nulle trace de surmenage ne sera observée.

L'extraction de la terre se fait au moyen de *benes* soulevées à l'aide de treuils que manœuvrent deux hommes. La benne est chargée d'un poids moyen de 250 kilogrammes, et l'action sur le treuil doit imprimer à la manivelle une vitesse de 35 à 40 tours par minute (*fig. 301 et 302*).

Sur l'un des chantiers observés, nous avons pu faire charger des cailloux à raison d'une pelletée en 3 secondes, et 14 pelletées par brouette, sans arrêt. La moitié du temps sert à enfoncer l'outil sous le tas et le charger, l'autre moitié à le vider dans la brouette et à le ramener sous le tas.

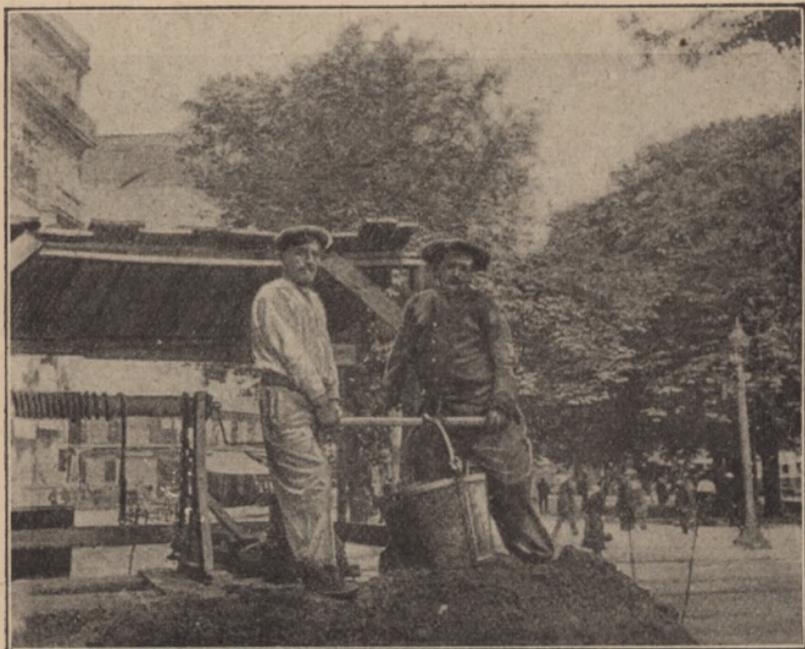


FIG. 302. — Manœuvre de la benne (J. Amar).

Lorsqu'on emploie des tombereaux, et que le *pelletage est vertical*, on doit ajouter au temps d'une opération 1 seconde de plus, toutes choses restant égales.

Au moyen de notre *pelle dynamographique*, nous constatons que l'effort d'enfoncement de la pelle dans le tas est le plus pénible ; il atteint parfois 35 kilogrammes. Mais l'ouvrier adroit ne dépasse jamais 15 à 20 kilogrammes, manœuvrant le fer avec souplesse et rapidité (*fig. 303*).

On examinera plus loin le brouettage, mais la guerre et

diverses circonstances avaient interrompu cette laborieuse étude des travaux de terrassements.

343. C. *Action des jambes.* — **Travail au cabrouet, à la brouette.** — Ce mode d'activité a donné lieu à des recherches d'ordre mécanique et musculaire — non énergétique — de la part de Imbert et Mestre; elles sont intéressantes et méritent d'être complétées.

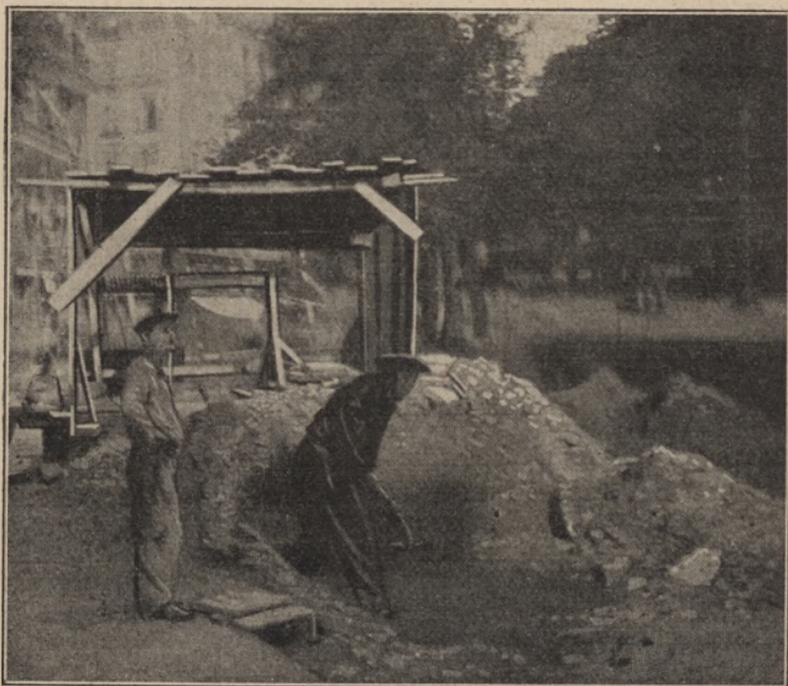


FIG. 303. — Enfoncement de la pelle sous le tas (J. Amar).

Le transport des terres se fait souvent à la brouette; celui de la pierre taillée, au moyen du *chariot* appelé *diable* ou *cabrouet*: c'est le *bardage*. Le travail des jambes est, ici, non moins important que celui des bras.

Dans le cas du cabrouet <sup>(1)</sup>, les actes mécaniques de l'ouvrier consistent dans la charge, le poussage ou trainage et

(1) Imbert et Mestre (Extrait du *Bulletin de l'Inspection du travail*, 1905, n° 5, p. 15 à 32).

la décharge. On enregistre donc les efforts normaux aux manches (soutien, charge et décharge) et dans la direction des manches (poussage). La technique a été donnée plus haut (§ 218). Voici maintenant les conclusions des auteurs :

« La charge d'un sac de 60 kilogrammes nécessite :

« 1° De la part du membre inférieur droit, une dépense de force équivalente à celle qui correspond à l'ascension d'une marche d'escalier haute de 12 centimètres environ (1) ;

« 2° De la part des muscles extenseurs du tronc et des muscles du membre supérieur droit, une dépense de force égale à 30 kilogrammes environ. »

Cette dernière condition est assez pénible pour les jeunes gens de quinze à seize ans. Les sujets de taille moyenne ou de grande taille se fatiguent un peu moins que les autres.

Pour l'évaluation du travail de chargement et de transport, à une distance de 24 mètres, de 62 sacs en une heure, on trouve ceci : le travail effectué au cabrouet, pendant une heure, pour le transport de sacs de 60 kilogrammes sur un sol horizontal cimenté, équivaut au moins à la somme suivante :

1° Une ascension verticale de 62 marches, soit un effort de 25 à 30 kilogrammes répété 62 fois ;

2° Un parcours horizontal d'environ 3 kilomètres ;

3° Un effort total de 1.862 kilogrammes effectué par les muscles du membre supérieur, par fraction de 30 kilogrammes.

Le travail de la marche, que nous évaluons en kilogrammètres pour un sujet de 70 kilogrammes, est (2) :

$$\frac{3.000 \times 70}{16} = 13.125 \text{ kilogrammètres.}$$

Par journée de 10 heures, ce serait 131,250 kilogrammètres.

(1) L'effort ainsi dépensé sert à maintenir les roues en place pour permettre le chargement du sac. Mais la comparaison d'un effort avec une ascension laisse à désirer, comme on l'a dit.

(2) Le travail de la marche est calculé d'après le rapport 16 du mètre-kilogramme au kilogrammètre.

344. Le transport au moyen du cabrouet demande quelques explications ; car la charge peut avoir son centre de gravité dans le plan qui passe verticalement par l'axe des roues  $O$  ; si donc l'ouvrier maintient les manches assez haut pour que le poids  $P$  de la charge porte uniquement en  $O$ , il aura juste à vaincre le frottement du sol et les résistances passives de l'axe des roues (fig. 304). Mais, si la charge est disposée de telle manière que son centre de gravité se trouve en  $G_1$  ou en  $G_2$  (fig. 305), elle agira en arrière ou en avant de  $O$  ; supposons-la en  $G_2$  (fig. 306) : cette force agira, en partie, au niveau

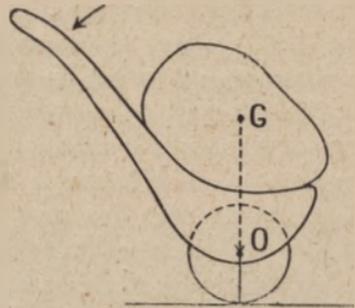


FIG. 304. — Position de la charge sur un cabrouet.

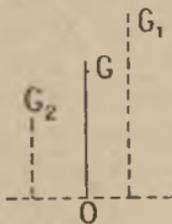


FIG. 305. — Positions diverses de la charge.

de l'axe  $O$ , en partie sur les bras de l'ouvrier ; un couple tendra à faire tourner le cabrouet dans le sens de la flèche. Si le centre de gravité est en  $G_1$ , il faudra, au contraire, appuyer sur les manches pour résister au couple de forces.

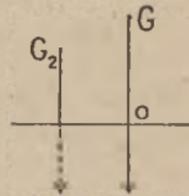


FIG. 306.

Sur un sol incliné, les conditions du transport vont encore se modifier : si le centre de gravité de la charge passe au point  $O$  (axe des roues), la force  $P$  aura une composante normale  $V$  produisant le frottement sur le sol ; ce frottement sera donc plus faible que sur un terrain horizontal ; et il y aura une composante horizontale  $H$  opposée à l'effort de progression, qui grèvera d'autant l'effort de poussage du travailleur (fig. 307) ; cette composante est proportionnelle à la pente du terrain.

Evidemment, pour élever les manches assez haut et porter le centre de gravité dans la direction de  $O$ , il faudra que l'ouvrier soit de grande taille ; à ce point de vue l'effort est donc plus prononcé de la part des hommes de petite taille.

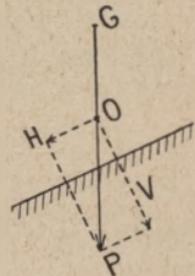


FIG. 307. — Les hachures figurent le terrain incliné.

Dans ses expériences, Imbert n'a point calculé le travail

de progression ; il constate, toutefois, que sur un sol cimenté horizontal, avec une charge portant sur les roues du cabrouet, il suffit d'un poids de 3 à 4 kilogrammes pour déterminer le mouvement de progression (mesure analogue à celle donnée plus haut pour la lime). Par conséquent, avec un effort moyen de 3<sup>ks</sup>,500, le travail des muscles des bras en dix heures d'action sera :

$$3,500 \times 3.000 \times 10 = 105.000 \text{ kilogrammètres.}$$

On arrive ainsi à un travail journalier total de :

$$131.250 + 105.000 = 236.250 \text{ kilogrammètres.}$$

La nature du terrain modifie très sensiblement cette valeur, parce qu'elle peut donner lieu à un frottement plus grand. Il est surtout intéressant de remarquer que, dans un mode d'activité normale, comme plus haut dans le cas du limeur, comme ici avec le chargeur au cabrouet, les phénomènes respiratoires augmentent leur rythme de 25 à 40 0/0, et les pulsations de 17 à 20 0/0 suivant les sujets. « La fatigue générale est peu marquée », mais celle des muscles des bras est sensible et met un assez long temps à disparaître. Celle de la jambe droite est moins sensible à cause de la force de ses muscles ; cela est surtout vrai chez les sujets adultes et pesants.

345. Le *transport à la brouette*, étudié par les mêmes méthodes (1), a ceci de particulier que la charge est généralement peu élevée, et que le véhicule ne possède qu'une seule roue ; l'effort de soutien est donc plus grand qu'avec le cabrouet et la fatigue plus prononcée. Considérant une brouette de 29 kilogrammes, la charge étant placée au milieu de la caisse, on aura un poids total P auquel l'effort de soutien sera proportionnel. Des mesures de Imbert nous déduisons que cet effort est les  $\frac{42}{100}$  du poids P. Il sera de 12 kilo-

(1) A. Imbert (*Bulletin de l'Inspection du travail*, 1909, n° 1 et 2).

grammes dans la marche à vide, car :

$$\frac{29 \times 42}{100} = 12 \text{ kilogrammes environ.}$$

On calculera aussi une valeur de la charge telle que, portée directement sur les bras ou dans une brouette, l'effort de soutien soit le même. Ce sera :

$$x = \frac{(29 + x) 42}{100}.$$

On trouve  $x = 21$  kilogrammes. Donc, c'est à partir d'une charge de 21 kilogrammes que l'usage de la brouette présente des avantages. Le résultat est intéressant, vu que l'effort des bras est limité et assez voisin de 20 kilogrammes. D'après la valeur qui a été donnée plus haut (§ 300), un fardeau de 21 kilogrammes, directement porté, est une limite pour le travail économique de l'ouvrier.

Dans la manœuvre de la brouette, le sujet agit rarement par son seul effort musculaire; il suffit de le voir marcher en inclinant son corps pour se douter que le poids de celui-ci intervient; par suite l'homme d'un poids lourd l'emportera, quant à l'effort à fournir, sur l'homme d'un poids léger. Imbert mesure l'effort de traction de la brouette chargée et roulant sur un terrain ordinaire<sup>(1)</sup>; nous avons vu sa technique (§ 218); il arrive à cette relation, que nous déduisons de ses chiffres :

$$F = P \times \frac{43}{1.000}.$$

Le poids total de la brouette chargée a été porté jusqu'à 110 kilogrammes environ. Sur un sol détrempe par la pluie et d'ailleurs résistant, l'effort est à peu près triple; on aurait :

$$F' = P \times \frac{132}{1.000}.$$

(1) Une allée de jardin, recouverte d'une couche de fins cailloux.

En laissant, pour un moment, toute considération de forces statiques de côté, nous calculerons qu'un parcours de 1 kilomètre sur terrain normal donnera lieu à un double travail, pour un adulte de 70 kilogrammes. On aura, avec un chargement de 20 kilogrammes seulement :

$$(20 + 29) \frac{43}{1.000} \times 1.000 + \frac{70 \times 1.000}{16} = 6.482 \text{ kilogrammètres.}$$

Si, comme avec le cabrouet, l'homme parcourt 30 kilomètres par jour, son travail sera :

$$6.482 \times 30 = 194.460 \text{ kilogrammètres.}$$

On devrait ajouter au poids du sujet le poids équivalant à la pression des manches sur les bras; l'homme sera, pour ainsi dire, chargé, et plus avec la brouette qu'avec le cabrouet.

A parcours égal, et avec un chargement de 60 kilogrammes, on aurait un travail journalier de :

$$(29 + 60) \frac{43}{1.000} \times 30.000 + \frac{(70 + 36) 30.000}{16} = 332.310 \text{ kilogrammètres environ,}$$

en adoptant 36 kilogrammes pour le poids soutenu sur les bras, d'après le coefficient  $\frac{42}{100}$ .

Ainsi, le travail à la brouette est plus grand que celui de la manœuvre du cabrouet toutes choses égales d'ailleurs.

Imbert observe, en conséquence, qu'il donne lieu à une activité respiratoire et circulatoire plus accentuée, comme rythmes, de 40 et 25 0/0, et à une douleur musculaire localisée surtout dans les bras et persistant plus que dans le cas du transport du cabrouet.

Les conditions précédentes ont trait à un travail supérieur à celui de la moyenne des ouvriers, car nous avons constaté que la durée du travail effectif est généralement de huit heures et demie. En outre, il reste à préciser l'influence de la vitesse et des relais.

346. **Expériences anciennes de brouettage.** — Coulomb détermine, au moyen du peson, l'effort de traction sur une brouette de 30 kilogrammes chargée, dans les travaux de terrassements et sur un sol sec et uni, de 70 kilogrammes de terre. Il trouve  $F = 2^{\text{kg}},500$ , soit un coefficient de :

$$\frac{2,5}{100} = \frac{25}{1.000}$$

Or, dans ses *Instructions* <sup>(1)</sup>, Vauban avait indiqué qu'un homme pouvait transporter  $14^{\text{m}^3},79$  de terre à  $29^{\text{m}},226$  de distance, effectuant 500 voyages ou un parcours de  $14^{\text{km}},613$ , avec retours à vide.

Donc, à l'aller, le travail sera :

$$14.613 \times 2,5 + \frac{70 \times 14.613}{16} = 97.964 \text{ kilogrammètres.}$$

L'effort de traction, au retour, sera seulement :

$$\frac{30 \times 25}{1.000} = 0^{\text{kg}},750,$$

et le travail :

$$14.613 \times 0,75 + \frac{70 \times 14.613}{16} = 82.392 \text{ kilogrammètres.}$$

Coulomb obtient un effort de soutien de  $19/100$ , soit 19 kilogrammes à l'aller et  $5^{\text{kg}},5$  au retour, conditions deux fois plus avantageuses que celles où se plaçait Imbert. L'effort moyen par voyage est donc de :

$$\frac{19 + 5,5}{2} = 12^{\text{kg}},250;$$

il s'ajoute au poids de l'homme pour donner un travail supplémentaire de :

$$\frac{12,25 \times 14.613 \times 2}{16}$$

(1) Vauban, *Instructions ou le Directeur général des fortifications, dans Oisivetés, loc. cit.* (voir p. 561 ci-dessus).

En totalisant toutes ces quantités, on obtient un travail journalier de 202.730 kilogrammètres.

347. Cas d'une brouette à deux roues. — En cherchant les conditions du travail maximum dans le transport des briques à petite distance, Frank Gilbreth <sup>(1)</sup>, dont nous verrons plus

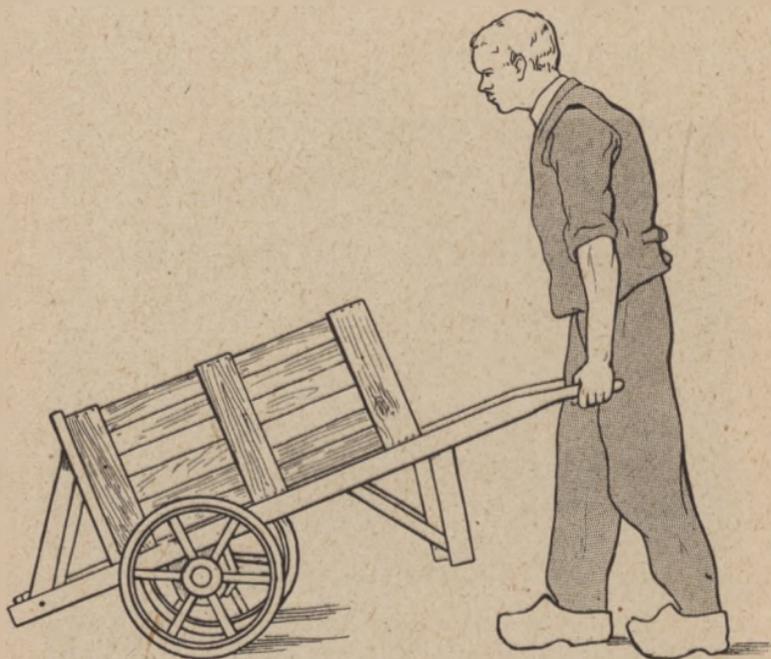


Fig. 308. — Transport des fardeaux sur une brouette à deux roues.

loin l'étude sur *le maçon*, observe que la brouette à deux roues occasionne moins de fatigue, parce qu'elle est mieux équilibrée que la brouette à une seule roue ; le travail maximum a lieu en transportant 480 à 490 kilogrammes par voyage, soit 216 briques (*fig. 308*).

Ce fait, vérifié plusieurs fois par l'auteur, n'est pas contestable ; nous croyons, cependant, qu'une charge de 500 kilogrammes entraîne une fatigue excessive, et que les faits demandent des précisions d'ordre physiologique.

(1) F. Gilbreth, *Motion Study*, p. 57, London, 1911.

Mais il est clair qu'avec deux roues le transport est plus facile. Guenyveau <sup>(1)</sup> mesura un effort de traction de 3 kilogrammes pour transporter une charge de 100 kilogrammes sur une charrette à deux roues qui en pèse 30, et un effort de 0<sup>kg</sup>,9 quand elle est vide; on fait ainsi 18 kilomètres par jour et l'on revient à vide; abstraction faite de l'effort de soutien, on calculera un travail de

$$18.000(3 + 0,9) + \frac{18.000 \times 2 \times 70}{16} = 230.700 \text{ kilogrammètres.}$$



FIG. 309. — Le sujet 2 traîne une charge plus lourde que le n° 1.

En résumé, si l'on adopte un parcours journalier de 30 kilomètres effectué au moyen d'une brouette à une seule roue chargée d'un fardeau de 60 à 80 kilogrammes, on ne sera pas loin du rendement optimum des ouvriers. La charge pourra varier de 100 à 500 kilogrammes avec une brouette à deux roues, mais alors il convient d'introduire un certain nombre de relais, de modifier la vitesse et le parcours dans des proportions que nous ne connaissons pas.

Tenant compte de nos expériences ci-dessus, et de l'em-

(1) Guenyveau, *Essai sur la science des machines*.

ploi d'une brouette à deux roues, nous trouvons qu'il est



FIG. 310. — Jeune homme traînant une faible charge (instantané).



FIG. 311. — Instantané montrant la flexion des jambes.

possible, à un terrassier, de transporter 100 kilogrammes

de terre à la vitesse de 5 kilomètres à l'heure, si le parcours ne dépasse pas 50 mètres, ou 1 mètre cube en un quart d'heure.

Les voitures à deux roues rentrent dans le cas précédent ; mais l'homme, au lieu de pousser, s'y attelle et les traîne. Les brancards auront 0<sup>m</sup>,60 à 0<sup>m</sup>,70 de long pour ne point gêner la locomotion. On adoptera 0<sup>m</sup>,55 à 0<sup>m</sup>,60 pour les brouettes.

Le coefficient de traction atteint  $\frac{25}{1.000}$  en moyenne (§ 267).

Un examen portant sur ce genre de travail montrera que l'ouvrier agit, en grande partie, par son poids ; il s'incline d'autant plus que le fardeau à traîner est plus lourd (fig. 309 et 310) ; il observe aussi, très souvent, la *marche en flexion* dont nous savons les avantages, diminuant ses oscillations verticales et augmentant, par contre, son allure. C'est ce qui se voit sur le jeune homme de la figure 310, et plus nettement sur la figure 311.

Le problème du *travail agricole* ne sera pas abordé ici ; nous lui avons fait une bonne place dans *Organisation physiologique*, et spécialement dans *Le devoir agricole* (1918).

**348. Cas des bicyclettes.** — Le cycliste peut se déplacer à vide, traîner ou pousser un autre véhicule. Dans le cas de la bicyclette (fig. 312), en appelant P la pression exercée sur la pédale, une force p est transmise à la chaîne ; et l'on a :

$$p = P \times \frac{oo'}{oA},$$

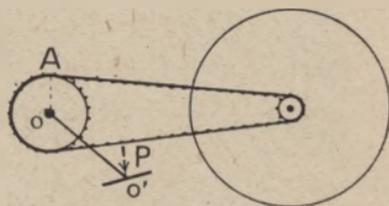


FIG. 312.

oo' étant le rayon de la pédale, et oA celui de la roue dentée. L'expérience a montré que  $oo' = 19$  centimètres tout au plus, pour permettre l'action commode et régulière des jambes, et que le rythme optimum des coups de pédale est de 90 par minute (§ 144).

Pour un parcours donné, le nombre de coups de pédales est inversement proportionnel au *développement* (c'est-à-dire à la longueur couverte par la roue motrice à chaque coup de pédale) ; il s'ensuit que l'effort des jambes est pro-

portionnel au développement ; en outre, la vitesse accroît les résistances passives et nécessite un effort plus grand. Il n'est donc pas permis d'augmenter ce développement de la même façon pour des sujets de forces et d'âges différents.

Léo Zuntz <sup>(1)</sup> a mesuré la dépense d'énergie d'une course à bicyclette pendant cinq à six minutes, en employant la méthode de N. Zuntz décrite ci-dessus (§ 301) et disposant le compteur à gaz sur le guidon, soit un poids de 7<sup>kg</sup>,500.

En prenant 65 kilogrammes pour l'homme, on aura :

$$65 + 7,5 = 72^{\text{kg}},500 \text{ (fig. 313).}$$

A la vitesse de 15 kilomètres à l'heure, le mètre parcouru coûte, en moyenne, 27 petites calories, soit un peu plus d'un

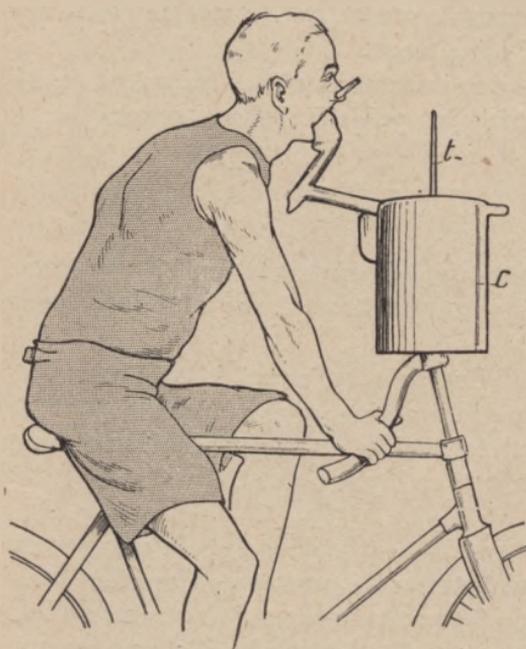


FIG. 313.

tiers de petite calorie par kilogramme et par mètre. La course à bicyclette est donc moins dispendieuse que la marche à pied. Dans les longues courses, la dépense tombe même à 0<sup>cal</sup>,26 ; mais à la vitesse de 21 kilomètres à l'heure, c'est 0<sup>cal</sup>,37. En général, la course à bicyclette est deux fois plus économique que la marche à pied, Elle appelle une

surveillance particulière sur le choix du véhicule et les atti-

(1) Léo Zuntz, *Untersuchungen über der Gaswechsel und Energieumsatz des Radfahrers* (Thèse, Berlin, 1899) ; Atwater, Sherman et Carpenter (*Bull.*, n° 98, p. 55 ; 1901).

tudes du corps. En se plaçant mal, ou se courbant sur le guidon (Schlechte Haltung) on se fatigue plus vite (1). Calculant le travail (§ 242) et la dépense, Léo Zuntz en déduit un rendement de 33 0/0.

L'entraînement remarquable des muscles puissants des membres inférieurs, et le faible effort de traction dans le roulement des roues; d'autre part, la possibilité d'adopter de grandes vitesses dans ce genre de locomotion, conduisent à un bon emploi de la force de l'homme.

On a réalisé des vitesses horaires de 32 à 33 kilomètres dans les courses cyclistes.

Dans la pratique journalière, on s'en tiendra aux vitesses de 15 à 16 kilomètres.

Mais lorsque la bicyclette est chargée, ou pousse un autre véhicule (cas des livreurs de magasins), la vitesse sera diminuée en proportion de la charge.

Supposant les roues des deux véhicules d'un même rayon, et la charge transportée d'un poids P, l'allure sera :

$$v = \frac{35}{\sqrt{P}};$$

on exprime  $v$  en kilomètres à l'heure, et P en kilogrammes. Toutefois le fardeau ne saurait être tel que  $v$  fût inférieur à 5 kilomètres.

Ainsi, pour  $P = 49$  kilogrammes,  $v = 5$  kilomètres.

Cette formule est approximative, mais suffisante.

Enfin, lorsque le sol est *incliné*, on appliquera les formules du § 311 en remplaçant L et L' par  $v$  et  $v'$ .

349. Le travail des jambes est utilisé dans le mouvement des *pedales* (tours, perforatrices de monotypes, meules, etc.); c'est une action périodique; la vitesse doit varier suivant les exigences du métier; l'effort dépend de la construction de la machine, c'est ainsi que l'on voit un rémouleur donner 25 coups de pédale par minute, et un autre 80; cette diffé-

(1) R. du Bois-Reymond, Berg et L. Zuntz (*Arch. f. Anat. u. Physiol.*, Suppl. 1904, p. 21). — Highley et Bowen (*Amer. Journ. of Physiol.*, 1905, t. XII).

rence créée, à l'avantage du dernier, une vitesse et une force vive considérables, et le travail s'effectue en peu de temps. Le remouleur appuie sur la pierre le tranchant à aiguiser et par là il exerce un effort plus ou moins grand avec les bras ; dans les moments où il cesse d'appuyer, pour retourner ou pour examiner l'instrument, le mouvement de sa jambe ne s'arrête pas ; il conserve ainsi la vitesse acquise et un régime normal de travail ; il marche à vide pour éviter la fréquence des mises en train.

### 350. D. *Travaux variés : Dactylographie, Couture, etc.*

— La plupart des travaux que nous venons d'étudier exigent une dépense de *force* ; il en est qui nécessitent surtout de la *vitesse* ; tels sont les travaux de couture, de broderie, les manipulations de machines à écrire et à calculer, les professions du pianiste et de tous ceux qui jouent d'instruments à corde, la danse. L'élément vitesse fait intervenir ce que nous avons déjà appelé l'*équation personnelle*, et qui est essentiellement un caractère physiologique individuel, acquis ou héréditaire (§ 86). Le *facteur matériel*, articulations du poignet, des doigts, des orteils satisfait à la condition du travail rapide : ces articulations ont, comme on sait, plusieurs degrés de liberté (§§ 77 et 94) ; le *facteur dynamique* doit également y satisfaire. Cependant, les hommes ne le possèdent pas tous au même degré ; en outre de la *raideur*, de la *gaucherie* qui signalent les débuts de l'apprentissage, tous ne sont pas capables de donner à leurs muscles des ordres instantanés, tous n'ont pas le même pouvoir de réagir aux excitations.

Aussi, doit-on distinguer les sujets à mouvements rapides de ceux qui ont des mouvements lents, et appliquer chacune de ces catégories au genre de travail où elle pourra exceller (§ 170).

On a particulièrement étudié le travail des *dactylographes* <sup>(1)</sup>. De diverses expériences, effectuées sur cinq sujets différents, il est résulté que le rythme des mouvements variant de 57 à 115 mots par minute, l'énergie physiologique s'accroît de

(1) T. Carpenter (*Journal Biol. Chem.*, t. IX, p. 231 ; 1911).

30 à 70 0/0 par rapport à l'état de repos. Par 1.000 mots on fait une dépense supplémentaire d'énergie équivalente à 7 Calories en moyenne, soit une consommation de 2<sup>gr</sup>,50 d'oxygène. Par 1.000 coups frappés sur la machine à écrire, on dépense 1<sup>Cal</sup>,60; et à mesure que le travail progresse, que les doigts se fatiguent, il semble que l'ouvrage se produise plus économiquement.

Nous avons trouvé, à l'aide d'un *doigt métallique* où une lame de ressort presse sur une toute petite poire de caoutchouc, que l'effort nécessaire pour enfoncer une *touche* de lettres ou de chiffres est d'environ 90 grammes, et le déplacement de 1<sup>cm</sup>,50. On donne 7 coups par seconde, soit un travail mécanique horaire de

$$0,090 \times 0,015 \times 7 \times 3.600 = 34^{\text{kgm}},02.$$

Chaque coup nécessite la flexion et l'extension du doigt; le travail musculaire a donc une valeur double d'environ 68 kilogrammetres ou  $\frac{1}{6}$  de Calorie (1).

A raison de 1<sup>Cal</sup>,60 par 1.000 coups, la dépense par heure sera :

$$\frac{1,60 \times 7 \times 3.600}{1.000} = 40^{\text{Cal}},32.$$

Il s'ensuit que la dépense d'énergie est hors de proportion avec le travail utile, à cause du nombre considérable des mouvements, des *mises en train*. Toutefois il est aisé de reconnaître que l'ouvrière dactylographe peut fournir, sans peine, dix heures de travail par jour dont 2<sup>h</sup> 30' de repos.

Carpenter a mis en évidence le rôle de l'habileté professionnelle, de l'attitude du corps, dans l'économie d'énergie. Il faut maintenir le buste droit, soutenir l'avant-bras, et donner des coups légers, vifs et nets; on change de feuille en 3 secondes, si l'on est bien placé, bien entraîné.

Le *pianiste* effectue un travail analogue au précédent : ses mouvements sont de 6 à 8 par seconde tout au plus (voir § 241). Sur un « presto » de Mendelssohn, un pianiste aurait joué 5.975 notes en 243 secondes, soit 24 notes par seconde (2). Cela demande à être contrôlé.

(1) J. Amar. *Mon Bureau*. du 15 novembre 1920.

(2) *Brit. med. Journal* (mai 1914).

Lestricoteuses vont beaucoup moins vite, si l'on compte le *point à l'endroit* et le *point à l'envers*, et il en est de même du travail au crochet.

La moyenne est de trois mouvements par seconde.

Si l'on surveille une femme qui « tricote », on lui trouve les coudes ouverts à 60°; un bras soutient l'ouvrage (c'est en général le gauche chez les droitières), l'autre manœuvrant l'aiguille. Ce dernier membre effectue par minute entre 125 et 150 mouvements de rotation (pronation, puis supination); il en résulte, au pli de flexion du coude, une rougeur qui persiste plusieurs heures après le travail.

C'est là une preuve de fatigue par excès de vitesse, et les ouvrières ont de la peine, quelquefois, à remuer les bras longtemps après leur journée terminée.

Il importe, par conséquent, dans tous ces métiers de vitesse, de prendre 4 à 5 minutes de repos au bout d'une demi-heure de travail. Un repos plus prolongé — d'un quart d'heure environ — suivra un exercice de deux heures. De sorte que l'on a, effectivement, 90 minutes de travail et 30 de repos, donnant respectivement 7<sup>h</sup>,30' et 2<sup>h</sup>,30' par journée maximum de 10 heures.

On a obtenu les mêmes résultats à peu près dans les ateliers américains, car on y a reconnu que l'ouvrière ne doit pas rester plus de 80 minutes devant sa machine, sous peine de voir sa production diminuer par l'effet du surmenage (1).

**350 bis. Ecriture.** — Les mouvements qui interviennent dans l'*écriture* sont susceptibles d'une analyse semblable à celle de la dactylographie ou de la couture.

On peut adopter pour cette étude le *porte-plume dynamographique* de Judd (1907), modifié légèrement par Drever (2). Une large bande de métal courbée prend le dos de la main; à cette bande s'attache un dispositif inscripteur donnant les mouvements de la *main*.

(1) S.-A. Clark et E.-W. Wyatt, *L'organisation scientifique appliquée au travail des femmes* (Voir *Revue de Métallurgie*, 1915, p. 298).

(2) Drever (*Proceed. Roy. Soc. Edimburg*, 1915, t. XXXIV, partie III, p. 230).

D'autre part, une double tétine en caoutchouc, l'une externe, la seconde interne, enveloppe la plume; l'espace intermédiaire est rempli de mercure et scellé. Un tube très étroit y pénètre et transmet la pression des *doigts* sur le mercure.

La plume vient, d'ailleurs, agir par sa partie supérieure contre une petite poire et donner la pression de la pointe; un système de guidage assure son mouvement.

Grâce à cette technique, Drever obtient les résultats suivants :

1° Les doigts guident les mouvements délicats de l'écriture, la main procure la vitesse par double rotation, autour du coude et autour du poignet. La première de ces rotations cesse dans l'écriture rapide ;

2° Chez les enfants, la main prédomine sur les doigts. Leur écriture est *crochue*; chez l'adulte, elle est *sinueuse*. Celui-ci semble obéir à une impulsion directrice, les autres procèdent par impulsions répétées ;

3° La *graphologie* révèle aussi que l'écriture masculine présente une pression maximum, l'écriture féminine *plusieurs* maxima. Cela pourrait permettre des *expertises*.

Faisons remarquer, toutefois, que ces traits sont loin d'être caractéristiques.

Nous avons précisé les détails de cette technique dans *Organisation physiologique* (supplément), ainsi que les conditions auxquelles le travail de bureau s'effectue sans fatigue et proprement ; nous n'y reviendrons pas.

French a même cru pouvoir déduire, de l'écriture, des indications sur le *caractère* des candidats (1). On aimerait mieux savoir dans quels cas elle trahit l'*alcoolisme*, ou le *tremblement sénile*.

Il est non moins intéressant de reconnaître ses altérations dans la *crampe des écrivains*. Ce trouble musculaire convulsif, signalé en 1833 par Heyfelder, n'a pas encore été expliqué. Et, cependant, il se manifeste chez les écrivains, pianistes, graveurs, télégraphistes, danseurs et danseuses.

Pour nous, c'est un désordre neuro-musculaire par sur-

(1) W.-L. French (*Industrial Management*, juillet 1917, t. LIII).

menage, quelle que soit l'origine de celui-ci : continuité d'action, excès de vitesse, d'attention et, le plus souvent, attitudes défectueuses du corps et des membres<sup>(1)</sup>.

**351. Sports.** — Les *sports* utilisent la vitesse d'une façon remarquable, et dans ce but ils éliminent les mouvements de grande amplitude; la *parade* d'un coup d'épée est dans ce cas; entre l'instant où un coup d'épée menace l'adversaire et celui où il est paré, il s'écoule environ  $\frac{18}{100}$  de seconde; déduction faite du temps nécessaire pour voir le coup, la parade n'a qu'une durée de  $\frac{1}{10}$  de seconde. La vitesse même de l'épée, dans le *coup droit*, est de 3<sup>m</sup>,42 (Marey). Le plus souvent elle varie de 2 à 3 mètres par seconde. La garde de l'escrimeur favorise les déplacements rapides du corps; mais elle est fatigante. Du reste il y a l'escrime de vitesse et l'escrime de force, celle-ci beaucoup plus pénible que l'autre.

Dans des conditions normales de rythme, la *gymnastique* sans appareils est un sport excellent, un exercice éminemment hygiénique. Elle forme les muscles et prédispose l'homme au meilleur travail. C'est aussi le cas de la *Danse*.

Le *canotage* entraîne une fatigue excessive. Ainsi on a effectué des mesures dynamométriques sur un canot monté par cinq rameurs, et l'on a trouvé que, à la vitesse de 5 mètres, la puissance de chacun s'élève à 22 kilogrammètres<sup>(2)</sup>, soit 237.600 kilogrammètres pour une durée effective de trois heures.

Un sport particulièrement dur, qui exige à la fois de la force et de la vitesse, c'est la *boxe*. Le *coup de poing* est très rapide : 6 à 8 mètres par seconde, mais sa durée totale est du même ordre que celle du coup d'épée<sup>(3)</sup>. Et dans le *foot-*

(1) L'art d'expertiser les écritures ou *Graphométrie*, ne se base pas encore sur des données scientifiques, malgré les analyses de Frazer (1894), A. Bertillon, etc.

(2) *Bull. Soc. ing. civ.*, décembre 1888.

(3) Démeny (*la Nature* du 11 octobre 1890). Il est inutile d'ajouter que la fatigue du boxeur se ressent de cette vitesse et de l'*attention* rapide qu'il doit exercer sur les mouvements de son adversaire. La *pression* du coup de poing peut dépasser 700 kg. (voir § 42 et 43), calculée par la formule  $mv = Ft$ , où  $t = 0,0003$ .

*ball*, il faut aussi un grand effort, mais court, et produit seulement au début du lancer.

En général, les sports et les arts de la guerre étudient avec soin les conditions du meilleur effet ; ils y ont obtenu des progrès sérieux. Les arts de la paix, qui sont la source du bien-être dans le monde, ne bénéficient pas encore d'études semblables ; moins de ténacité dans les recherches, moins de soucis d'économiser les forces humaines ; le gaspillage, en cette matière, n'est pas un signe d'abondance ; c'est la résultante fatale d'une mauvaise organisation économique (Voir aussi § 362). Il y faut des *Fiches d'aptitudes*.

**352. Part de l'activité nerveuse.** — L'énergie utilisable de l'homme n'est pas exclusivement musculaire, ni, comme on se l'imagine, inconsciente. Nombre de métiers, et spécialement la boxe et l'escrime, sollicitent l'activité de l'esprit, et donnent lieu à une *dépense nerveuse* importante. L'habileté professionnelle est faite d'attention et d'intelligence ; à la longue elle tend à devenir *automatique* ; mais les qualités ainsi acquises n'en sont pas moins une charge pour le travail nerveux qui en assure la manifestation, qui produit la vitesse.

Le choix de personnes possédant ces qualités accélère la marche d'un atelier. Taylor en donne l'exemple suivant : des ouvrières sont occupées à la *vérification des billes de bicyclettes* ; elles placent sur le dos de la main gauche une rangée de petites billes d'acier poli, les font rouler dans l'intervalle des doigts rapprochés, et examinent, à une vive lumière, si elles ne sont pas rayées, fissurées, entaillées. Les billes défectueuses sont retirées au moyen d'un aimant tenu dans la main droite. « Ce travail exigeait des vérificatrices l'*attention* la plus soutenue, et la fatigue nerveuse des ouvrières était considérable, bien qu'elles fussent confortablement assises. »

En diminuant peu peu la durée du travail, qui était de dix heures et demie, et en choisissant les ouvrières, les contrôlant, les dirigeant, Taylor parvint à les faire travailler huit heures et demie seulement et à élever leur rendement journalier. Il tenait compte, surtout, de leur *équation personnelle*, et déplaçait toutes celles qui ne satisfaisaient pas aux conditions d'un travail rapide, en particulier les plus

bavardes. Son enquête scientifique lui apprend que dix minutes de récréation devaient succéder à soixante-quinze minutes de travail, et qu'il fallait quatre intervalles de repos dans la journée pour permettre aux ouvrières de se promener et de causer ensemble.

En assez peu de temps, 35 d'entre elles, soit 29 0/0, réussirent à faire le travail de 120, à une très vive allure, et le fini était supérieur des 2/3 à ce qu'il était auparavant. Mais c'est une sélection cruelle, qui semble due au surmenage.

**353. Exemple d'organisation du travail : art du maçon.** — En étudiant le *travail à la lime*, nous avons montré que la science des exercices professionnels conduit à l'art de travailler économiquement, ou encore d'augmenter son rendement. Aussi instructive et aussi complète est l'application faite par Gilbreth des principes de travail scientifique à l'*art du maçon* <sup>(1)</sup>; donnons-en quelques détails. Gilbreth fait également usage de la méthode mathématique qui consiste à étudier *isolement* les différentes *variables* d'une fonction, celles que nous avons mentionnées dans le livre IV sous les appellations de : conditions internes et conditions externes. Le lecteur n'aura donc qu'à s'y reporter.

Et voici les constatations relatives au *maçon* :

1° S'il est gaucher, on changera les places des briques et du mortier pour la commodité des mouvements, et on évitera tout obstacle à leur exécution la plus rapide. L'échafaudage sera disposé à cette fin (*fig. 314*); il sera plan, et ses montants n'empêcheront pas l'ouvrier de saisir en même temps la brique et le mortier.

2° Pour manœuvrer les paquets de briques, la charge ne doit pas dépasser 40 kilogrammes pour un homme robuste (de première catégorie), 27 à 31 kilogrammes pour un homme de seconde catégorie, de moindre force.

3° Un aide placera les briques et le mortier à portée de la main du maçon, celui-ci devant s'occuper uniquement de les poser (*fig. 315*); le sommet de la brique étant à hauteur

(1) Frank Gilbreth, *Motion Study*, 1911. Voir aussi : Id. *Fatigue Study*, New-York, 1916, et *Applied Motion Study*, New-York, 1917.

de la main, il y a économie de un mouvement pour la po-

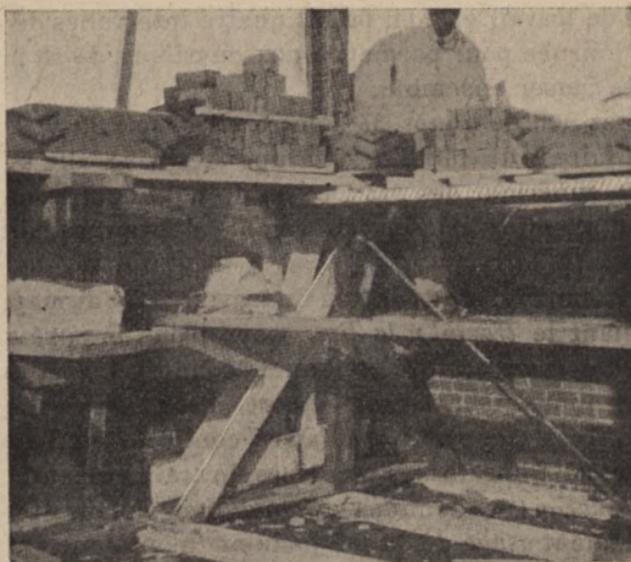


FIG. 314. — Échafaudage commode pour le travail du maçon (d'après Gilbreth).



FIG. 315. — Briques et mortier à portée de la main du maçon.

ser ; et le mouvement a lieu suivant l'action de la pesanteur (B), sans contraction (A, *fig.* 316).

4° D'après la hauteur du mur, le paquet de briques sera surélevé progressivement, et l'homme ne devra, en aucun

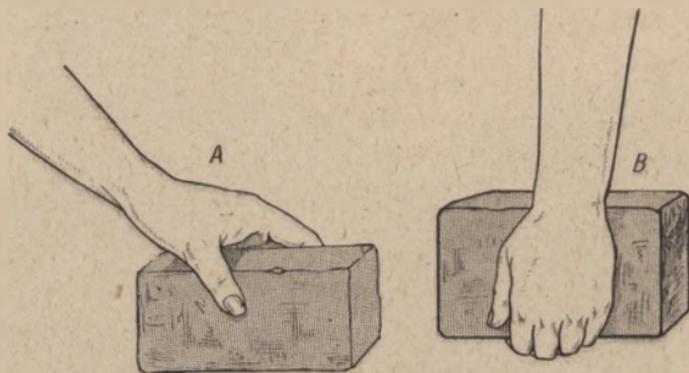


FIG. 316.

cas, se baisser pour ramasser les matériaux ni surtout pour travailler (fig. 317 et 318). De fait, il est ridicule de mettre



FIG. 317. — Ouvriers baissés pour ramasser les briques.

en mouvement presque toute la masse du corps pour élever une brique de 2 kilogrammes. Comme démonstration de



FIG. 318. — Ouvriers travaillant courbés.



FIG. 319. — Déplacement de pavés à la main. Attitudes défectueuses des ouvriers (J. Amar).

cette mauvaise méthode, nous citerons le cas d'ouvriers qui déchargent des tombereaux de pavés : l'un d'eux ramasse sur le sol ces pavés un à un, les passe à l'un de ses compagnons, qui les lance à un troisième pour être définitivement jetés dans un enclos.

Il n'est pas possible d'imaginer plus de maladresses à la fois (*fig. 319*).

5° Le travail rapide, et dans les conditions précédentes,

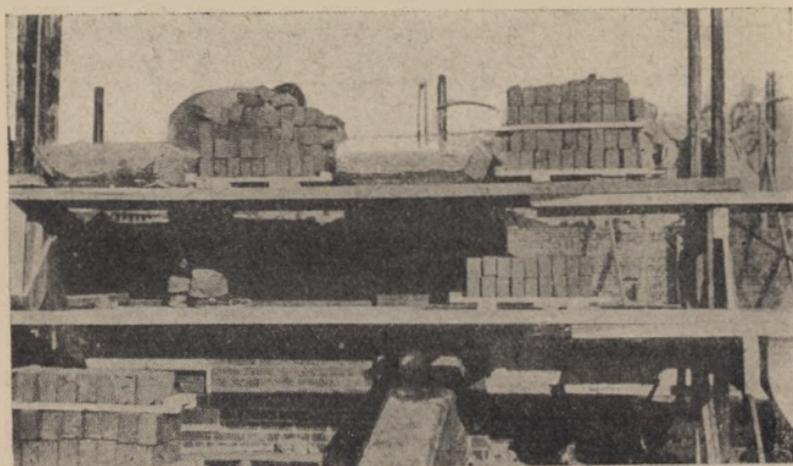


FIG. 320. — Échafaudage scientifique.

n'oblige qu'à de courts intervalles de repos, mais de repos *reel*.

6° La plate-forme de l'échafaudage doit être constamment à 0<sup>m</sup>,65 *au-dessous* du niveau du mur, à moins que celui-ci ne doive pas dépasser la hauteur à laquelle la main peut atteindre ; dans ce dernier cas, on prendra 0<sup>m</sup>,86.

Les figures 320 et 321 montrent un échafaudage convenablement disposé avec ses piles de briques, et un chantier organisé.

7° Le maçon aura près de lui un support pour y appuyer la pelle ou l'y suspendre ; son mortier sera convenablement préparé, sans rognures ni cailloux ; la truelle sera d'un type spécial qui permette de répandre le mortier pour plusieurs

briques à la fois. Gilbreth indique un modèle de truelle (Fontain Trowel) qui fournit le mortier d'un seul coup à 21 briques.

8° Pour l'aide-maçon, le transport des paquets se fera sur une brouette à deux roues ; à égalité de fatigue, on transporte ainsi 216 briques au lieu de 60 (brouette à une seule

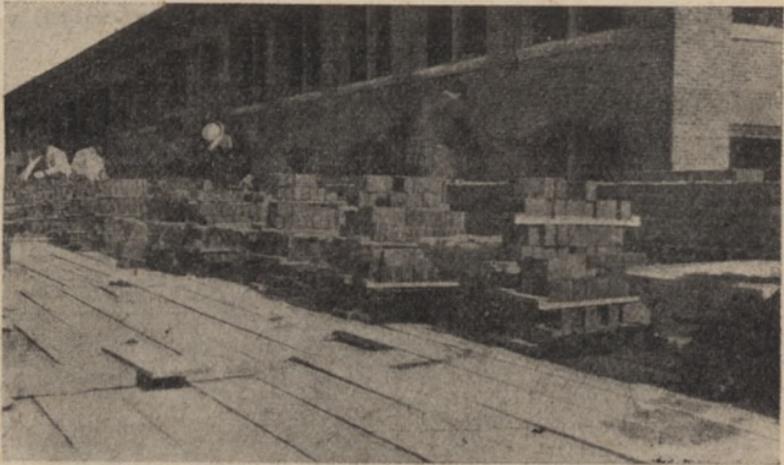


FIG. 321. — Chantier organisé scientifiquement.

roue). La brique ordinaire a pour dimensions :

$$22 \times 11 \times 5,5 \text{ centimètres.}$$

9° Le poids de l'outil n'est pas un élément indifférent : un marteau de 1<sup>kg</sup>,800 pour casser, de 1<sup>kg</sup>,950 pour creuser des trous (voir § 323) ; une pelle de 9<sup>kg</sup>,75 pour remuer les matériaux ; une truelle pour briques agglomérées, une truelle plus grande pour briques ordinaires.

Les conditions d'un travail rapide ne sont pas seulement celles de l'outillage ; Gilbreth examine les facteurs internes, tels que l'alimentation, l'état de santé, l'état moral de l'homme ; il examine ensuite le problème relatif aux mouvements économiques, et note ceci :

10° Les pieds du maçon seront posés de telle manière que le déplacement des briques soit rapide et les oscillations du

corps très faibles ; les mains travailleront symétriquement et suivant un rythme que l'on se donnera en comptant les mouvements à haute voix ; on évitera les secousses, les chocs, on combinera les mouvements pour qu'ils servent à des fins nombreuses ; on ne ramassera pas, durant le travail, le mortier tombé ; il coûte moins de combler avec du bon ciment un intervalle inférieur à une demi-brique que de broyer une brique ou d'en chercher un morceau qui comble cet intervalle.

11° On doit limiter les mouvements du maçon à ceux de la construction ; pas d'arrêts, pas de balancements du corps ni des bras ; pas de grande amplitude dans le déplacement de l'outil ou de la brique ; on n'ouvrira pas une poche de ciment en déchirant le papier et séparant les morceaux, mais d'un coup de pelle on fend le papier à la base du sac et on le vide en le tirant par un bout.

12° La vitesse des mouvements est un facteur décisif du meilleur rendement.

Ayant analysé avec méthode les défauts qui se présentent couramment dans le travail du maçon, on lui donne une *Carte d'instruction* qui lui enseigne la manière de les éviter, les dispositions à prendre, les mouvements nécessaires et les plus commodes, les mouvements inutiles dont la suppression s'impose.

Si la méthode Gilbreth est bien observée, l'économie est de 13 mouvements sur 18 que nécessite la pose d'une brique ; elle peut même atteindre 16, soit 2 mouvements par brique.

Il est clair que l'outillage, l'organisation du chantier influent tout autant sur le travail que l'habileté professionnelle et l'art d'approprier les divers actes musculaires.

Comme illustration de ces principes scientifiques Gilbreth cite le cas suivant : il avait à construire un mur d'usine de 0<sup>m</sup>,30 d'épaisseur, avec deux sortes de briques, joints finis sur les deux parements. L'ancienne méthode de pose donnait 120 briques par heure et par homme ; la nouvelle, conforme aux lois d'une rigoureuse analyse, lui a donné 350 briques, soit un rendement triple (1).

(1) Voir aussi Taylor et S. E. Thompson, *Pratique de la construction en béton* (Dunod, 1914).

354. **Taylorisme.** — En résumé, les ingénieurs américains qui ont appliqué ces lois reconnaissent unanimement que le meilleur travail, qualitatif et quantitatif, de l'homme, exige quatre conditions :

1° Détermination correcte des lois et circonstances du travail, ainsi que de l'outillage le plus adéquat ;

2° Éducation et, même, élimination des ouvriers inhabiles, afin de n'en avoir que d'absolument propres à la tâche ;

3° Contrôle par des agents instruits et bienveillants, de manière à primer les bons ouvriers et blâmer et corriger les mauvais ;

4° Répartition égale du travail et de la responsabilité entre employeurs et employés, pour créer entre eux une solidarité, une entente qui profite à tous.

La première condition est, assurément, la plus importante ; mais il n'en est pas moins certain que l'ouvrier doit être patiemment et constamment dressé ; des instructions écrites ne lui suffisent pas ; il ne les consultera pas, en cédant à la routine ; d'où la nécessité de vérifier, à tout moment, qu'il comprend et applique ces instructions, qu'il lui apparaît clairement, enfin, à quels avantages réels pour lui comme pour le patron, conduira la méthode scientifique de travail professionnel.

Enfin, on doit s'efforcer d'appliquer chaque homme à la tâche où il peut être utile, sans jamais le sacrifier à des cupidités excessives.

En terminant, nous citerons deux faits qui révèlent le caractère général de la méthode scientifique du travail, en même temps que l'attention qu'elle exige.

1° Dans les bureaux de *Industrial Engineering*, des employées expédiaient jusqu'à 20.000 lettres par jour, qu'elles pliaient et cachetaient. Un examen attentif de ce mode de travail le fit modifier de telle façon que sa production nécessita *quatre fois moins de temps*. Une des jeunes filles réussit même à timbrer 100 à 120 enveloppes par minute, sans se fatiguer plus que de coutume. Elle empilait les lettres de manière que les adresses lui fussent visibles : les timbres étaient découpés par bandes : pour se succéder horizontale-

ment et non pas verticalement. Ensuite elle fixait à l'index de sa main droite une petite éponge humide, et, prenant une bande de timbres de cette même main, les humectait en déplaçant la bande avec le pouce, et les collait sur les enveloppes. La main gauche tirait les enveloppes timbrées, le pouce achevait de coller les timbres et de les détacher de la bande, et les lettres tombaient par leur poids dans un panier convenablement disposé.

2° Un ami de Gilbreth, ayant visité l'exposition anglo-japonaise de Londres, aperçut une jeune fille qui mettait des papiers dans des boîtes de cirage avec une adresse merveilleuse. Il y conduisit le savant pour lui montrer que, d'instinct, la jeune fille appliquait la bonne méthode. Mais Gilbreth n'eut pas plutôt examiné ce travail étonnant de célérité qu'il sortit son chronomètre, nota les mouvements inutiles et mesura le temps nécessaire pour préparer 24 boîtes : c'était 40 secondes. Il dit alors à la jeune fille qu'elle faisait *mal* son travail. Celle-ci, très sûre de son habileté, se moqua de lui, mais consentit à négliger les mouvements qu'il jugeait inutiles ; comme d'ailleurs elle travaillait à la pièce, elle fut tentée par l'idée d'un salaire supérieur. En peu de jours, la jeune ouvrière parvint à faire les 24 boîtes, non plus en 40 secondes, mais seulement en 26 secondes. Elle avoua, en outre, que la réduction du nombre de mouvements de ses muscles lui avait rendu le travail moins pénible.

Quelle plus instructive leçon que celle-là de la nécessité d'une organisation scientifique du travail ?

Gilbreth a encore soutenu que l'*écriture*, avec ses fantaisies, ses fioritures, est, elle aussi, *antieconomique*. Il y a certainement une part de vérité dans cette observation.

Le système de Taylor a donc, par son caractère général, cause gagnée, surtout dans l'industrie. Il a mis en pratique les conclusions, que peut-être le savant américain ignorait, formulées par Chauveau, mais pas complètement si l'on songe à l'absence de critérium du degré de fatigue, et au surmenage dont il n'écarte pas la possibilité.

355. **Méthode physiologique.** — Le problème de la fatigue dominera toujours et conditionnera l'organisation du travail

humain. Il a gagné en importance dans ces trente dernières années où l'on a vu les machines de l'industrie se perfectionner, nécessitant en conséquence un personnel plus attentif, intelligent, dépensant beaucoup d'énergie nerveuse.

La fatigue d'origine cérébrale, pour être invisible, n'en est pas moins certaine et mesurable.

Le travail du savant, de l'ingénieur, de l'homme de bureau, est considérable et produit sur l'organisme les mêmes effets d'épuisement que le travail des muscles.

L'ouvrier, qui commande le tour ou surveille plusieurs machines, éprouvera ces effets de lassitude, si des précautions scientifiques ne les écartent pas de lui.

La psycho-physiologie du travail est donc inséparable de l'organisation mécanique (1).

Telle fut notre conception dès 1903, alors que nous ignorions totalement les principes de l'ingénieur américain.

Et puisqu'aujourd'hui que nous les connaissons, nous n'en répudions rien, on comprend pourquoi notre tâche aura été — ainsi qu'on l'a dit — « d'humaniser le Taylorisme ». Pas de sélection qui entraîne l'élimination, pas de surmenage, mais l'emploi de *chacun* pour la meilleure utilisation de toutes ses capacités (2).

**356. Travail de la parole.** — L'activité musculaire se manifeste non moins évidemment chez l'homme qui *parle* que chez l'homme qui déplace un fardeau. Mais le travail de la parole est complexe : il comprend celui de la *phonation* proprement dite, qui est une élimination d'un volume d'air variable suivant la vitesse de la parole et l'intensité du son ; l'air étant expiré ou inspiré sous une pression H, et V étant

(1) Consulter à cet égard, F. et L. Gilbreth, *The Psychology of Management* ; New-York, 1914.

(2) La méthode physiologique, ou méthode française, a été généralement appelée *Système Amarien*, par exemple en Italie (voir G. Perrando et Gualdi : *Bolletino lombardo* de septembre 1916 ; — G. Angelici, *Le otto ore e l'organizzazione scientifica delle fabbrica* ; Rome, 1920, etc.). Elle date de 1909.

son volume, le travail du soufflet respiratoire sera :

$$C = V \times H.$$

Il faut mesurer  $H$  dans la *trachée-artère* du sujet, en se servant, par exemple, d'une canule réunie à un manomètre (fig. 322), et mesurer  $V$  au spiromètre à la température des poumons et à la pression du moment.

Cagniard-Latour<sup>(1)</sup> fit le premier une observation de ce genre sur une personne âgée de trente-deux ans, dont le *larynx* présentait accidentellement un trou de  $0^{\text{cm}},8$  à  $0^{\text{cm}},9$  de diamètre. Le manomètre à eau indique  $+ 4$  centimètres à l'expiration, et de  $- 5$  à  $- 6$  centimètres à l'inspiration, soit en valeur absolue une pression

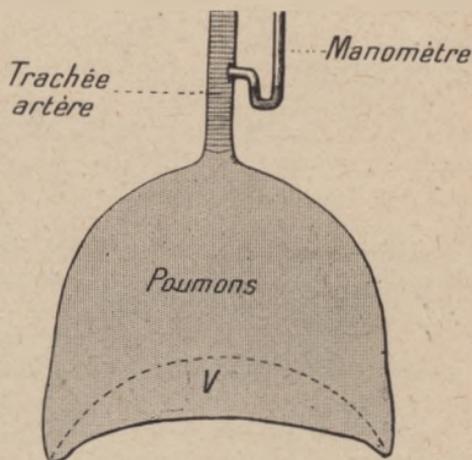


Fig. 322. — Schéma des poumons et des bronches.

moyenne respiratoire de 5 centimètres. Or un adulte déplace par *heure* un volume d'air de 500 litres environ. Donc :

$$C = 500 \times 0,05 \times 2 = 50 \text{ kilogrammètres.}$$

« On voit, concluait Cagniard-Latour, que les efforts d'où naît l'insufflation motrice des vibrations laryngiennes ne sont pas aussi légers que l'on aurait pu le supposer, d'après la facilité remarquable avec laquelle la voix semble, pour l'ordinaire, se produire. »

Le même savant observe une pression de  $0^{\text{m}},30$  quand l'homme joue de la clarinette. Comme les échanges gazeux

(1) Cagniard-Latour (*Comptes Rendus Acad. Sciences*, t. IV, p. 201 ; 1837).

augmentent dans cet exercice, le travail de phonation serait voisin de 550 à 600 kilogrammètres. Pour les *sons très aigus*, on obtient jusqu'à 94 centimètres d'eau.

Marage <sup>(1)</sup>, qui avait repris cette étude vers 1904, rencontra deux cas intéressants : le premier est relatif à un homme ayant subi l'ablation totale du larynx, et dont il fit communiquer la trachée, par un tube souple, avec une anche membraneuse en caoutchouc fixée à un palais artificiel ; le tube, mis en rapport avec le manomètre, donna une pression de 0<sup>m</sup>,10 à 0<sup>m</sup>,20 pendant la *conversation ordinaire*, et 2.070 litres d'air expiré par heure. D'où :

$$\mathcal{T} = 2,070 \times 2 \times 0,15 \text{ (en moyenne),}$$

ou

$$\mathcal{T} = 621 \text{ kilogrammètres.}$$

Le second sujet <sup>(2)</sup> avait une canule trachéale permettant de mesurer H. L'expérience donna H = 0<sup>m</sup>,10 à 0<sup>m</sup>,16, en moyenne 0<sup>m</sup>,13, et V = 300 litres. On a donc, *au repos* :

$$\mathcal{T} = 300 \times 2 \times 0,13 = 78 \text{ kilogrammètres.}$$

L'expérimentation avec un larynx artificiel n'est pas conforme aux conditions naturelles ; elle crée une gêne respiratoire et des efforts anormaux ; le volume d'air débité (2.070 litres en une heure) est trop fort ; ce sont des conditions de fatigue : elles n'ont pas permis au sujet de discuter dans une grande salle ; tandis que l'autre a donné : V = 1.440 litres et H = 10 à 20 centimètres, soit T = 288 et 576 kilogrammètres, en moyenne 434 kilogrammètres. Ne considérant que le larynx naturel, on pourra admettre que le travail de phonation varie de 50 à 600 kilogrammètres environ *par heure*.

Ce qui modifie la grandeur de ce travail, c'est l'effort nécessaire pour que, dans des salles de plus en plus vastes, la voix soit nettement *perçue*. Le *minimum de travail*, correspondant à cette perception, a été évalué en utilisant une même note, *fa*<sub>2</sub>, par exemple, rendue par une *basse*, un

(1) Marage (*Journal de Physique*, 1908, p. 298).

(2) *Id.* (*ibid.* et *Physiologie de la Voix*, Paris, 1911).

baryton, un *tenor* ; et on employait, pour cela, un larynx artificiel ou *sirène à voyelles*.

Les résultats *comparatifs* furent les suivants :

| SALLES                             | TENOR | BARYTON  | BASSE |
|------------------------------------|-------|----------|-------|
| Sorbonne (amphitheatre Richelieu). | 1,00  | 0,24 (?) | 7,14  |
| — (Chapelle).                      | 4,19  | 5,71     | 42,38 |
| Académie de médecine.....          | 4,42  | 4,28     | 12,38 |
| Trocadéro.....                     | 4,19  | 5,71     | 66,66 |

Ainsi le travail de l'orateur est *plus pénible* chez les barytons, et encore plus chez les basses que chez un ténor. Il y a gaspillage d'énergie avec les deux premiers. Généralement l'orateur dépasse les valeurs minima que nous venons d'indiquer, parce qu'il ne s'agit pas, pour lui, d'être une *voix perceptible*, mais de se faire entendre sans peine par ses auditeurs. La diction parfaite facilite le « port » de la voix ; et, dans la pratique, il convient d'augmenter *peu à peu* l'énergie de sa voix jusqu'à l'instant où le son diffusé par les murs, les personnes, les objets (son de « résonance ») soit perçu par l'orateur. Il n'y a aucune utilité à *forcer* la voix, car l'auditeur saisit mal les nuances d'une voix très forte, tandis qu'au *seuil acoustique*, elles sont très sensibles à l'oreille (1).

Si l'on compare hommes, femmes et enfants entre eux, on trouve que, pour le même effet utile, les femmes se fatiguent *4 fois moins* que les hommes, parce que leurs cordes vocales sont plus courtes ; l'avantage est encore plus grand chez les enfants, qui, chacun sait, parlent avec une extraordinaire abondance.

Les limites de la voix humaine sont :

|  |   |             |
|--|---|-------------|
| Basse... $fa_1$ à $fa_3$ , équivalant à 174 à 696 vibrations simples |   |             |
| Ténor... $ut_2$ à $ut_4$   | — | 261 à 1.044 |
| Alto... $fa_2$ à $fa_4$  | — | 348 à 1.392 |
| Soprano. $ut_3$ à $ut_4$   | — | 522 à 1.044 |

(1) Voir André Marcelin, *Thèse*, Paris, 1920.

Quant aux limites de la perception auditive, elles correspondent à un *minimum d'intensité sonore* ou d'énergie incidente, c'est-à-dire agissant sur une surface normale déterminée. On a nommé *Phonie* l'intensité sonore qui correspond à 10 ergs (§ 65) (Stefanini). La sensibilité de l'oreille est maximum quand le son émis correspond à 500 vibrations environ, soit à une énergie de 1 cent-millionième d'erg par seconde et par centimètre carré; cette quantité d'énergie est si faible qu'avec 1 kilogrammètre on entreprendrait le son pendant plusieurs milliers d'années. Le pouvoir auditif normal de l'oreille, à la distance de 2 mètres, est une petite fraction d'erg (1). Ajoutons que la sensation « restante », après qu'un son a cessé, dure d'autant plus que ce son était plus bas. Et enfin que l'acoustique des salles dépend de leur capacité et de l'absorption qui a lieu par les murs, les objets et les personnes; elle correspond, pour être bonne, à une résonance dont la durée se trouve comprise entre  $\frac{1}{2}$  et  $\frac{3}{4}$  seconde. En appelant C la capacité de la salle, A l'absorption par les murs, N le nombre de personnes, la durée T de la résonance se déduit de la relation :

$$T = \frac{0.17C}{0.44N + A}$$

La fatigue de l'orateur est donc fonction de diverses variables, dont quelques-unes encore sont mal connues (2), telle la réflexion du son par les murs.

357. *Dépense d'énergie chez l'orateur.* — La mesure de la dépense d'énergie chez l'orateur, le chanteur, ne peut s'obtenir que par le moyen d'une *chambre calorimétrique*, comme celle d'Atwater et Benedict. La soupape respiratoire, pour recueillir les gaz expirés et déterminer la consommation d'oxygène, ne permet que difficilement de *parler*. A titre d'indication, nous rapporterons une expérience faite dans ces conditions, avec une soupape ajustée à la bouche par une large membrane de caoutchouc :

(1) A. Stefanini (*Nuovo Cimento*, 1920, t. XIX, p. 5) et (*Arch. ital. Otol. Rinol. Laring.*, 1916, t. XXVII, p. 199).

(2) Sabine (*Journ. Franklin Inst.* janvier 1915).

Sujet de 69 kilogrammes, trente ans :

$$\begin{array}{l} \text{Échanges gazeux} \\ \text{au repos et par heure} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} 565^1,30 \text{ mesurés à } 0^\circ \text{ et } 760 \text{ mm.} \\ \text{CO}^2 = 2,55 \text{ 0/0} \quad \text{O}^2 = 3 \text{ 0/0} \\ \frac{\text{CO}^2}{\text{O}^2} = 0,855. \end{array} \right.$$

$$\text{Oxygène consommé par heure : } \frac{565,30 \times 3}{100} = 16^1,96.$$

Après une récitation<sup>(1)</sup>, au rythme de 150 syllabes par minute, de manière à être nettement entendu dans une pièce de 250 mètres cubes, et à la distance de 6 mètres, on a obtenu :

$$\begin{array}{l} \text{Échanges} \\ \text{gazeux par heure} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} 799^1,50 \text{ mesurés à } 0^\circ \text{ et } 760 \text{ millimètres.} \\ \text{CO}^2 = 3,10 \text{ 0/0} \quad \text{O}^2 = 3,60 \text{ 0/0} \\ \frac{\text{CO}^2}{\text{O}^2} = 0,86. \end{array} \right.$$

$$\text{Oxygène consommé par heure : } \frac{799,50 \times 3,6}{100} = 28^1,78.$$

La dépense d'énergie due à la phonation est donc de :

$$28,78 - 16,96 = 11^1,82 \text{ d'oxygène,}$$

ou, en grandes calories :

$$11,82 \times 4^{\text{Cal}},90 = 57^{\text{Cal}},92 \text{ par heure.}$$

Nous savons qu'un homme qui s'élève rapidement sur une montagne dépense 4 Calories par 425 kilogrammètres effectués (rendement moyen de 25 0/0). L'équivalent en travail d'une lecture à haute voix pendant une heure et sans autres mouvements sera :

$$\frac{57,92}{4} \times 425 = 6.154 \text{ kilogrammètres,}$$

soit une ascension de 100 mètres en montagne, à la vitesse de 100 mètres à l'heure.

(1) On récitait *le Rire* de Sully-Prudhomme, étant assis sur une chaise et ne faisant aucun mouvement.

Il faut remarquer, cependant, que l'orateur, le chanteur, l'acteur font de nombreux mouvements musculaires dont l'équivalent énergétique s'ajoute à la dépense précédente. Pour réaliser « l'expression », l'artiste joue de tous ses membres et de tous ses muscles, si bien que le travail de phonation n'est plus appréciable en comparaison de toute cette activité musculaire.

Le rythme de la respiration augmente sensiblement par l'exercice de la parole, ainsi que la profondeur des inspira-

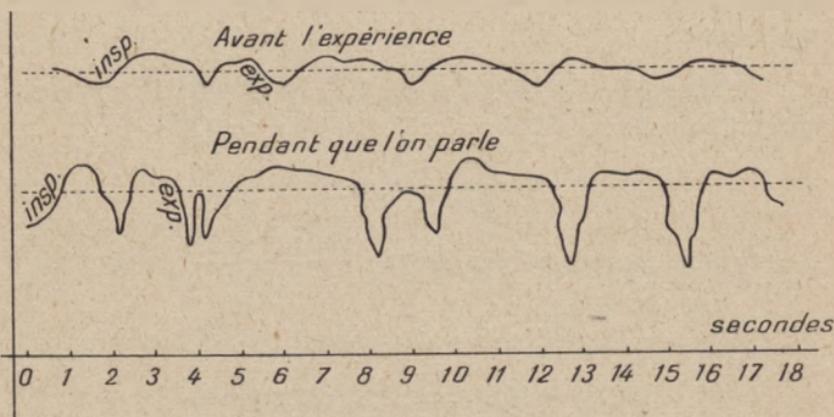


FIG. 323. — Courbes respiratoires de l'orateur.

tions et des expirations; celles-ci sont bien plus prolongées que celles-là, au moins dans le rapport de 2 à 1 (fig. 323); il semble que l'ampliation thoracique se maintienne durant que l'on parle, et ne diminue que très faiblement, l'inspiration étant brève. Enfin, les courbes respiratoires sont accidentées, irrégulières. Toutefois ces pneumogrammes ne montrent pas du tout de quelle façon jouent les poumons. Nous avons, au contraire, établi que les *tonogrammes* sont ici infiniment instructifs <sup>(1)</sup>, car ils échappent aux gestes de l'orateur et aux anomalies du mouvement thoracique.

Ces tonogrammes montrent que, dans la parole, l'expiration

(1) Jules Amar, *l'Éducation respiratoire*; Dunod, Paris, 1920, p. 80 et suiv. — Voir aussi un article de M. Ponzio (*Arch. ital. Biol.*, 20 nov. 1916, t. LXIV).

peut atteindre 7 à 8 fois la durée de l'inspiration, en un plateau soutenu, seulement zigzagué par les syllabes prononcées.

En général, l'orateur entraîné scande sa parole pour ne point dépasser le rythme respiratoire de 40 par minute, ce qui lui évite de s'essouffler, de se troubler au point de devenir incompréhensible aux auditeurs.

On a traité ailleurs l'art de parler et de chanter (*loc. cit.*).

**358. Travail intellectuel.** — Il a été déjà expliqué que les nombreuses expériences de l'école d'Atwater n'ont pu établir que le travail intellectuel le plus intense puisse donner lieu à une *dépense d'énergie mesurable en calories*. C'est ainsi que la dépense statique d'un physicien, enfermé pendant trois jours dans un calorimètre, ne subit aucun accroissement appréciable à la suite d'une grande activité de l'esprit (calculer, étudier un traité allemand de physique) (1). Et cependant nous savons que cette activité diminue la puissance musculaire, produit des substances toxiques dans l'organisme, et détermine une fatigue générale (§ 156). Si elle se continue huit à dix heures, la circulation se ralentit, les propriétés de la matière nerveuse sont altérées : elle réagit moins aux excitations, l'équation personnelle augmente, et généralement l'énergie des sens décroît.

Si le travail intellectuel ne se laisse pas évaluer en calories, s'il peut durer plus longtemps que le travail musculaire, il n'en est pas moins certain que, sous le rapport de la *fatigue*, une simple question de degré les sépare l'un de l'autre, et qu'il est nécessaire de faire état de la fatigue intellectuelle qui accompagne plus ou moins les exercices professionnels.

L'activité de la pensée, à l'exemple de l'activité musculaire, est susceptible de discipline et de méthode. Une grande puissance intellectuelle peut se manifester dans le désordre et le débordement. Un pareil gaspillage est la suite d'une éducation anti-scientifique et d'habitude de raisonnement dérégées ; les mécanismes délicats du cerveau ne doivent être ni faussés, ni excédés... On a indiqué dans Or-

(1) *Bulletin* n° 44 et 136 (1897 et 1903).

ganisation (*loc. cit.*), la méthode qui convient au travail de l'esprit. Ce domaine de la *Psycho-physique* est encore voilé par les nuées du spiritualisme.

359. **Rations alimentaires suivant les professions.** — La grandeur du travail musculaire ou nerveux varie d'un métier à un autre et la même variation affecte nécessairement la dépense d'énergie, la *ration alimentaire*. Aussi des enquêtes ont-elles été faites à ce sujet.

En *régime libre*, l'homme n'étant pas troublé dans ses habitudes de vie, la ration d'entretien de l'adulte au repos est de  $1^c,57$  par kilogramme et par heure <sup>(1)</sup>; Armand Gautier <sup>(2)</sup> trouve  $1,60$ ; Hirn  $1,53$ ; mais les Américains avaient obtenu (il est vrai dans un milieu à  $20^{\circ}$ ) :  $1^c,32$ . Il semble que la moyenne générale se rapproche de  $1^c,50$  dans les conditions ordinaires.

Telle est la *dépense statique* par kilogramme et par heure.

La dépense totale de l'homme (*dépense dynamique brute*) couvre les frais du *travail*, dont la valeur se modifie d'un sujet à un autre. On a donc fait des enquêtes pour savoir ce que consomment les familles, et cela dans divers pays. On rend homogènes les résultats en affectant un *coefficient* aux femmes et aux enfants, d'après le tableau de la page 444.

La consommation d'une famille, composée du mari, de la femme et d'un garçon de quinze ans, sera :

$$1 + 0,80 + 0,80 = 2,60 \text{ fois celle de l'homme seul.}$$

L'enquête sur les Parisiens a donné à Ch. Richet une ration moyenne de 3.262 Calories en vingt-quatre heures par adulte, comprenant les proportions pondérales de :

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| Protéiques.....          | 17,50 0/0 |
| Graisses.....            | 11,50 0/0 |
| Hydrates de carbone..... | 71,00 0/0 |

A. Gautier confirme ces proportions, mais obtient un

<sup>(1)</sup> Jules Amar, *le Rendement de la machine humaine*, p. 57, 72.

<sup>(2)</sup> A. Gautier, *l'Alimentation et les Régimes*, 3<sup>e</sup> éd., 1909.

valeur énergétique plus faible et probablement plus exacte : c'est 2.567<sup>C</sup>,80, soit :

$$\frac{2.567,80}{65 \times 24} = 1^{\text{Cal}},65 \text{ par kilogramme-heure.}$$

Au même nombre, sensiblement, arrivent : Lapicque (1), étudiant les Abyssiniens et les Malais (moyenne : 1<sup>Cal</sup>,60), et Mori (2) et Tahara (3) (moyenne : 1<sup>Cal</sup>,65) sur les Japonais.

Ces trois derniers auteurs ont considéré des rations abondantes en riz et en légumes.

Entre 1<sup>Cal</sup>,65 et 1<sup>Cal</sup>,50, la différence 0<sup>Cal</sup>,15 représente la *dépense dynamique* par kilogramme-heure dans la vie ordinaire, soit en l'espace de dix heures :

$$0,15 \times 65 \times 10 = 97^{\text{Cal}},50.$$

C'est, d'après le rendement moyen de 25 0/0, un petit travail par jour d'environ :

$$97.50 \times 0,25 \times 425 = 10.400 \text{ kilogrammètres.}$$

Pour un travail de 70.000 kilogrammètres, Amar (4) et Atwater (5) obtiennent 1<sup>Cal</sup>,90 en moyenne. A mesure que la production augmente, la dépense d'énergie s'élève. Les Américains ont étendu leur enquête à près de 14.000 personnes des États-Unis du Nord, calculant la ration d'après la consommation de collectivités telles que pensionnats, ateliers, etc. ; ils reconnurent, que dans les contrées étudiées, on abuse des *aliments protéiques* ; cet excès accroît la masse musculaire, et crée le « type du bœuf » (Taylor). En moyenne, ils eurent :

(1) L. Lapicque (*Comptes Rendus Biol.*, 1893, p. 251-258 ; *Archives de Physiol.*, 1894).

(2) Mori (*Arch. f. Hygiene*, t. V, 333 ; 1886).

(3) Tahara (*Bull. Inspect. Sanit. Labor. Tokio*, n° 2 ; 1887).

(4) Jules Amar, *le Rendement...*, p. 72.

(5) Atwater et Benedict (*Bull.*, 109, p. 140 ; 1902).

| SUBSTANCES           | PROTEIQUES         | GRAISSES               | HYDRATES<br>DE CARBONE |
|----------------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| Origine animale..... | 72 <sup>gr.</sup>  | 118 <sup>gr.</sup> ,40 | 24 <sup>gr.</sup> ,30  |
| — végétale.....      | 51                 | 14,00                  | 363,30                 |
|                      | 123 <sup>gr.</sup> | 132 <sup>gr.</sup> ,40 | 387 <sup>gr.</sup> ,60 |

360. L'*Institut Solvay* a enquêté dans les ménages ouvriers, en leur fournissant des carnets où ils inscrivent les denrées consommées par quinzaine (voir § 247); il admet que les ouvriers mangent tout ce qu'ils achètent. « L'enquête a porté sur 1.250 ménages, représentant un total de 6.000 individus environ » d'origine belge (1). Il s'agissait de mineurs, cultivateurs, tisseurs, carriers, etc., gens développant une certaine puissance musculaire; pourtant la quantité journalière de protéiques ne fut que de 90 grammes en moyenne, s'élevant dans les métiers pénibles et quelque peu dans les cas de bons salaires, s'abaissant à 30 et 35 grammes dans les métiers mal payés et surtout peu pénibles.

Pour la dépense énergétique, elle fut de 50 *Calories* environ par kilogramme en vingt-quatre heures, et tirait son origine surtout des *aliments ternaires* (graisses et hydrates de carbone); on a donc 2 *Calories* par kilogramme-heure.

Les savants enquêteurs reconnurent la *diversité* qualitative et quantitative de l'alimentation ouvrière; elle leur parut surtout « fautive, mal comprise, mal adaptée au but physiologique auquel elle doit répondre, et généralement insuffisante » (*loc. cit.*, p. 109).

A cela on peut ajouter que toutes les enquêtes relatives aux ouvriers ont conduit aux mêmes conclusions, à peu de différences près. On ne rappellera pas ici sans intérêt les enquêtes relatives à la *sous-alimentation* durant la guerre. En général, les civils consommèrent moins de viande et

(1) A. Slosse et E. Waxweiler, *Recherche sur le travail humain dans l'industrie...*, Bruxelles, 1910.

plus de graisse, d'après l'observation de 40 familles ouvrières de Glasgow, de 1915 à 1917 inclusivement. Leur dépense énergétique fut, en moyenne, de 1 calorie par kilogramme-heure, soit une diminution du tiers<sup>(1)</sup>.

(1) Les enquêtes sur l'alimentation sont déjà nombreuses. Nous citerons notamment :

EN ANGLETERRE : Rowntree, *Poverty. A study of town life*, London 1902; Paton, Dunlop et Inglis, *A study of the diet of the labouring classes in Edinburgh*, London, 1898; Cameron (*Proceed. of the Roy. Society of Edinburgh*, 1906).

EN BELGIQUE : Slosse et Waxweiler (*loc. cit.*); A. Lonay (*Revue d'hygiène alimentaire*, 1906, p. 70); Julin (*la Réforme sociale*, 1891-92).

EN SUÈDE : Hultgren et Landergren, *Untersuchung ü die Ernährung schwedischer Arbeiter*, Stockholm, 1891. *En Finlande* : Carl Tiegerstedt, *Ueber die Nahrungs-Zufuhr des Menschen...* (Helsingfors, 1915).

EN ALLEMAGNE : Ohlmüller (*Zeitsch. f. biol.*, 1884); Voit (*ibid.*, 1889); Stefan, *Die Ernährung des Bauern. Dissertation*, Würzburg, 1890.

EN FRANCE : Maillard (*Revue d'hygiène alimentaire*, 1909); A. Imbert (*ibid.*, 1906); de Maroussem, *la Question ouvrière, Ébénistes du faubourg Saint-Antoine*, Paris, 1892; Landouzy et Labbé (*Presse médicale*, 1905); O. Picquet (*Revue d'hygiène alim.*, 1906).

EN ITALIE : Albertoni, *Sul bilancio nutritivo del contadino italiano*, Bologne, 1894; id., *Sul bilancio nutritivo di una familia borghese italiana*, 1897; id. et Rossi, *Bilan nutritif du paysan des Abruzzes...* : *Arch. ital. biol.*, 1908, etc.

EN AFRIQUE : L. Lopicque (*Arch. de Physiol.*, 1894); Jules Amar, *le Rendement de la machine humaine*, 1910.

Pour l'alimentation en temps de guerre, on mentionnera surtout :

Miss Ferguson (*Proceed. Roy. Soc.*, Edimbourg, 1917-18, tome XXXVII, p. 117, et tome XXXVIII, p. 40); Lambing, *Précis de Biochimie*, 2<sup>e</sup> édit., 1919; Benedict, Miles, Roth et Smith, *Human Vitality and Efficiency under Prolonged Restricted Diet*; Publication n° 280; Washington, 1919.

Plus intéressants les résultats qui ont trait à diverses professions (1).

| PROFESSIONS                          | PROTÉIQUES     | GRAISSES                   | HYDRATES<br>DE CARRONE     | POUVOIR (*)<br>CALORIFIQUE    |
|--------------------------------------|----------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Constructeurs.....                   | 204 gr.        | 264 <sup>sr</sup> ,00      | 744 <sup>sr</sup> ,00      | 6.466 <sup>Cal</sup> ,20      |
| Marins.....                          | 140            | 145,00                     | 558,00                     | 4.181,30                      |
| Ouvriers du halage..                 | 171            | 171,00                     | 460,00                     | 4.143,20                      |
| Mécaniciens.....                     | 153            | 139,00                     | 528,00                     | 4.057,00                      |
| Charpentiers.....                    | 151            | 154,00                     | 459,00                     | 3.902,40                      |
| Manœuvres.....                       | 142            | 142,00                     | 444,00                     | 3.694,80                      |
| Marchands de quatre-<br>saisons..... | 141            | 164,00                     | 377,00                     | 3.616,20                      |
| Cultivateurs.....                    | 139            | 119,00                     | 345,00                     | 3.067,30                      |
| Cheminots.....                       | 104            | 129,00                     | 344,00                     | 3.010,70                      |
| Bijoutiers.....                      | 101            | 106,00                     | 296,00                     | 2.592,30                      |
| Veilleurs.....                       | 87             | 96,00                      | 296,00                     | 2.443,90                      |
| Teinturiers.....                     | 72             | 98,00                      | 314,00                     | 2.474,40                      |
| Marins en pension..                  | 96             | 129,00                     | 181,00                     | 2.309,60                      |
| Sculpteurs sur bois.                 | 87             | 89,00                      | 262,00                     | 2.240,80                      |
| Domestiques.....                     | 57             | 41,00                      | 237,00                     | 1.578,50                      |
| <b>Moyennes....</b>                  | <b>123 gr.</b> | <b>132<sup>sr</sup>,40</b> | <b>387<sup>sr</sup>,60</b> | <b>3.298<sup>Cal</sup>,30</b> |

(\*) Le pouvoir calorifique est calculé ici au moyen de nos coefficients 4<sup>Cal</sup>,10; 9<sup>Cal</sup>,10 et 4<sup>Cal</sup>,10 (§100). Atwater avait adopté provisoirement les chiffres de Rubner : 4<sup>Cal</sup>,10; 9<sup>Cal</sup>,30 et 4<sup>Cal</sup>,10.

En faisant la synthèse de toutes les enquêtes, Tiegerstedt(2) répartit en sept classes les régimes ouvriers, au point de vue de leur valeur énergétique :

- |                              |                              |
|------------------------------|------------------------------|
| 1° De 2.000 à 2.500 calories | 5° De 4.000 à 4.500 calories |
| 2° De 2.500 à 3.000 —        | 6° De 4.500 à 5.000 —        |
| 3° De 3.000 à 3.500 —        | 7° De 5.000 et au-delà.      |
| 4° De 3.500 à 4.000 —        |                              |

Voici, maintenant, la composition et la valeur moyenne

(1) Atwater et Woods (*Bull.*, n° 46, p. 117); Atwater et Bryant (*Bull.*, n° 116, p. 74-75). Les nombres relatifs aux domestiques sont douteux.

(2) Tiegerstedt, in *Nagel's Handbuch...*, t. I, p. 549-550.

de chaque régime ; nous désignerons par *t* et *a* les chiffres de Tiegerstedt et ceux des savants américains ; et nous rapporterons la valeur énergétique au kilogramme-heure :

| CLASSES | HYDRATES<br>DE CARBONE | GRAISSES | PROTÉIQUES | ENERGIE    | PAR KILO-<br>GRAMME-HEURE |
|---------|------------------------|----------|------------|------------|---------------------------|
| 1°      | <i>t</i> .. 295 gr.    | 81 gr.   | 86 gr.     | 1.921 Cal. | 4 Cal. 43                 |
|         | <i>a</i> .. 362        | 44       | 82         | 2.007      | 1 ,21                     |
| 2°      | <i>t</i> .. 345        | 108      | 88         | 2.501      | 1 ,50                     |
|         | <i>a</i> .. 464        | 60       | 104        | 2.600      | 1 ,54                     |
| 3°      | <i>t</i> .. 409        | 125      | 103        | 2.936      | 1 ,75                     |
|         | <i>a</i> .. 466        | 85       | 127        | 2.900      | 1 ,71                     |
| 4°      | <i>t</i> .. 476        | 137      | 125        | 3.364      | 2 ,00                     |
|         | <i>a</i> .. 556        | 93       | 136        | 3.332      | 2 ,00                     |
| 5°      | <i>t</i> .. 538        | 158      | 116        | 3.762      | 2 ,25                     |
|         | <i>a</i> .. 569        | 135      | 162        | 3.827      | 2 ,29                     |
| 6°      | <i>t</i> .. 557        | 195      | 145        | 4.223      | 2 ,50                     |
|         | <i>a</i> .. 737        | 106      | 182        | 4.277      | 2 ,54                     |
| 7°      | <i>t</i> .. 666        | 235      | 145        | 4.954      | 2 ,92                     |
|         | <i>a</i> .. 952        | 156      | 166        | 5.433      | 3 ,25                     |

On voit qu'instinctivement les conditions d'activité ouvrière donnent lieu à une consommation de protéiques généralement surabondante. Pflueger et quelques-uns de ses élèves ont toujours soutenu qu'elle était *nécessaire* à l'organisme ; mais leurs arguments sont loin d'être décisifs. Les enquêtes ne sont pas, d'ailleurs, des preuves péremptoires en l'espèce. Ainsi de nombreuses populations négligent les protéiques pour les hydrates de carbone (Tyrol, Afrique, Japon, Chine, etc.) ; le Finlandais prend à peine 40 grammes d'albumines par jour<sup>(1)</sup>, sauf le paysan, qui dépasse 120 grammes.

Mais les enquêtes ont établi deux faits essentiels :

1° La dépense *dynamique brute* peut s'élever, par un grand travail, à 80 Calories par kilogramme et par jour, soit à  $\frac{80}{24} = 3^{\text{Cal}},33$  par kilogramme-heure ; il semble que, normalement, on ne puisse pas excéder une telle dépense plusieurs

(1) Sundström, *Unters. über d. Ernährung d. Landbevölkerung in Finland*, Helsingfors, 1908.

jours de suite. Pour un adulte, ce sera :

$$80 \times 65 = 5.200 \text{ Calories}$$

en vingt-quatre heures. Comme on avait :

$$1^{\text{Cal}},50 \times 24 \times 65 = 2.340 \text{ Calories}$$

pour la *dépense statique*, il en résulte que le plus grand travail journalier équivaut à :

$$0,25 (5.200 - 2.340) = 715 \text{ Cal.} \quad \text{ou} \quad 300.000 \text{ kgm. environ.}$$

2° Le second fait est qu'on ne doit pas modifier le régime alimentaire *habituel*; il est certainement mieux assimilé et d'un meilleur rendement<sup>(1)</sup>. On doit se contenter simplement d'améliorer la qualité des aliments et de les fournir à l'homme en proportions suffisantes. C'est généralement ce qu'il faut pour alimenter les *indigènes des colonies* sans affaiblir leur rendement. Il n'est pas d'habitudes plus invétérées, d'ailleurs, que celles du *plat local*, de certaines préparations culinaires qu'on observe dans telle ou telle province. Aux heures de disette, il y a des aliments de remplacement à très bon marché; C. Tiegerstedt a même signalé l'usage, en Finlande, d'*écorce de pin grillée* et réduite en poudre, ainsi que de *foin pulvérisé*. Ils fourniraient respectivement 45 et 30 0/0 de leur énergie<sup>(2)</sup>.

**361. Boissons alcooliques.** — Signalons aussi la consommation des boissons alcooliques.

La meilleure statistique est due à M. Gabrielsson<sup>(3)</sup>; elle porte sur la consommation moyenne par habitant et par an, *réduite en alcool pur*; les chiffres concernent les années 1905 à 1910, pour les pays suivants :

(1) Les *traditions alimentaires* ne sont pas contraires aux données de la science; elle les rattache à des « influences psychiques » stimulantes des sécrétions digestives (Pawloff).

(2) C. Tiegerstedt, *Ofversigt af Finska Vetenskaps, Societätens Förhandlingar*, t. LXI, n° 16-17; 1919.

(3) Gabrielsson, *Consommation des boissons alcooliques dans les différents pays*. Alcan, 1915.

| PAYS            | TOTAL<br>EN LITRES<br>d'alcool pur | POURCENTAGE |      |       |
|-----------------|------------------------------------|-------------|------|-------|
|                 |                                    | EAU-DE-VIE  | VIN  | BIÈRE |
| France.....     | 22,93                              | 19,3        | 65,9 | 14,8  |
| Italie.....     | 17,29                              | 2,9         | 96,7 | 0,4   |
| Espagne.....    | 14,02                              | 11,5        | 64,5 | 24,0  |
| Angleterre..... | 9,67                               | 21,6        | 2,1  | 76,3  |
| Autriche.....   | 7,78                               | 47,6        | 28,9 | 23,5  |
| Hongrie.....    | 7,62                               | 61,0        | 34,1 | 4,9   |
| Allemagne.....  | 7,47                               | 49,0        | 8,9  | 42,1  |
| Portugal.....   | 12,59                              | 4,1         | 95,6 | 0,3   |
| Belgique.....   | 10,58                              | 25,9        | 6,3  | 67,8  |
| Russie.....     | 3,41                               | 89,3        | 3,0  | 7,7   |
| Etats-Unis..... | 6,89                               | 40,0        | 4,7  | 55,3  |
| Pays-Bas.....   | 5,01                               | 71,5        | 4,0  | 24,5  |
| Norvège.....    | 2,37                               | 60,6        | 8,3  | 31,1  |
| Danemark.....   | 6,82                               | 76,6        | 3,5  | 19,9  |
| Roumanie.....   | 5,25                               | 52,4        | 45,8 | 1,8   |
| Suisse.....     | 13,71                              | 13,9        | 60,9 | 25,2  |

Ce tableau comporte divers enseignements. Il montre que la France occupe toujours un rang privilégié pour la consommation en alcool : 23 litres par an et par habitant, évalués en alcool pur.

Ce sont les pays méridionaux, producteurs de vin, qui l'emportent sur les autres. *Le vin fait boire de l'alcool.* Et l'on constate, par contre, que dans les pays où l'on absorbe des eaux-de-vie, la consommation a un taux assez faible. Mais, c'est la *proportion d'eau-de-vie qui augmente avec la latitude.* Et elle varie, voyons-nous, *en raison inverse de la proportion de vin ou de bière.*

On verra plus loin que cette loi se vérifie aussi bien dans les villes que dans les États.

M. Gabrielsson a noté un fait qu'il convient de mentionner : c'est que la statistique de 1905-1910, comparée à celle de 1891-95, démontre une *décroissance de l'usage des eaux-de-vie dans les pays civilisés*, sauf pour la France, la Russie, les États-Unis. La Belgique ne figure plus, en 1922, que pour 2 litres d'alcool.

La lutte contre les spiritueux est donc à entreprendre énergiquement (Loi Ribot, loi Vandervelde, etc.).

Lord d'Abernon a établi <sup>(1)</sup> que les *mesures restrictives*, adoptées en Angleterre à la fin de 1914 contre les spiritueux, eurent rapidement d'heureuses conséquences. Confrontant les années 1913 et 1916, il voit baisser la mortalité, les cas de *delirium tremens* et les condamnations pour délits d'ivresse.

La diminution a été, en général, plus marquée chez les femmes, soit 50 0/0 contre 40 0/0. L'année 1916 fut, évidemment, meilleure que 1915.

L'examen du tableau précédent inspirerait d'autres considérations; par exemple les *affinités ethniques* semblent se refléter dans les habitudes de tempérance ou dans l'abus. La Russie a un régime qui la sépare du reste de l'Europe, tandis que les pays latins s'apparentent *spiritueusement*, si l'on ose dire; de même l'Autriche et l'Allemagne, etc.

362. — Si l'on examine les boissons alcooliques en elles-mêmes, sans les réduire en alcool, on retrouve des constatations analogues. On le fera pour un seul pays.

Voici les chiffres en hectolitres pour la France :

CONSOMMATION TOTALE ANNUELLE (en hectolitres).

| ANNEES | VINS<br>DIVERS | CIDRES<br>POIRÉS<br>HYDROMELS | VINS<br>de<br>RAISINS SECS | BIÈRES     | SPRITUEUX |
|--------|----------------|-------------------------------|----------------------------|------------|-----------|
| 1907   | 69.107.201     | 3.333.151                     | 2.692                      | 11.349.098 | 2.514.810 |
| 1908   | 65.158.962     | 19.956.279                    | 1.207                      | 11.748.796 | 2.538.030 |

Ces quantités sont même inférieures à la réalité, attendu que l'octroi n'existe pas dans plusieurs villes. La statistique du ministère des Finances a calculé, sur les données de l'octroi, la consommation par habitant dans les grandes villes, et par année (tableaux).

Une remarque des plus intéressantes doit être faite ici :

(1) *Brit. Med. Journ.*, 1917, p. 651.

BOISSONS ALCOOLIQUES. — CONSOMMATION PAR HABITANT  
(année 1908).

| VILLES                  | VINS   | CIDRES | BIERES | SPIRITUEUX | TOTAL   |
|-------------------------|--------|--------|--------|------------|---------|
| Paris.....              | 235 l. | 2 l.   | 16 l.  | 4, 44      | 257, 44 |
| Marseille.....          | 180    | »      | 11     | 4, 07      | 195, 07 |
| Lyon.....               | 205    | »      | 11     | 3, 41      | 219, 41 |
| Bordeaux.....           | 255    | »      | 4      | 3, 03      | 262, 03 |
| Lille.....              | 31     | 1      | 338    | 4, 42      | 374, 42 |
| Toulouse.....           | 263    | »      | 10     | 2, 81      | 277, 81 |
| Saint-Etienne.....      | 318    | »      | 11     | 3, 45      | 332, 45 |
| Nice.....               | 222    | »      | 16     | 2, 76      | 240, 76 |
| Nantes.....             | 222    | 11     | 5      | 2, 82      | 240, 82 |
| Le Havre.....           | 71     | 44     | 18     | 12, 33     | 145, 33 |
| Roubaix.....            | 19     | 1      | 323    | 3, 97      | 346, 97 |
| Rouen.....              | 75     | 113    | 13     | 12, 30     | 213, 30 |
| Nancy.....              | 202    | »      | 85     | 2, 87      | 289, 87 |
| Reims.....              | 165    | 6      | 51     | 4, 72      | 226, 72 |
| Toulon.....             | 195    | »      | 8      | 4, 63      | 207, 63 |
| Amiens.....             | 53     | 17     | 70     | 7, 84      | 147, 84 |
| Limoges.....            | 247    | 4      | 7      | 2, 39      | 260, 39 |
| Brest.....              | 107    | 7      | 17     | 5, 78      | 136, 78 |
| Angers.....             | 173    | 7      | 4      | 2, 74      | 186, 74 |
| Tourcoing.....          | 15     | 1      | 278    | 4, 15      | 298, 15 |
| Nîmes.....              | 308    | »      | 8      | 2, 63      | 318, 63 |
| Montpellier.....        | 439    | »      | 7      | 2, 82      | 448, 82 |
| Rennes.....             | 51     | 440    | 23     | 6, 18      | 520, 18 |
| Dijon.....              | 174    | »      | 7      | 3, 04      | 184, 04 |
| Grenoble.....           | 224    | »      | 10     | 2, 90      | 236, 90 |
| Orléans.....            | 187    | 1      | 5      | 3, 46      | 196, 46 |
| Tours.....              | 251    | 3      | 10     | 3, 12      | 267, 12 |
| Calais.....             | 32     | 1      | 182    | 8, 03      | 223, 03 |
| Le Mans.....            | 47     | 21     | 5      | 5, 90      | 78, 90  |
| Saint-Denis.....        | 279    | 4      | 24     | 4, 67      | 311, 67 |
| Levallois-Perret.....   | 264    | 4      | 16     | 4, 48      | 288, 48 |
| Clermont-Ferrand.....   | 266    | »      | 12     | 3, 35      | 281, 35 |
| Besançon.....           | 259    | »      | 31     | 3, 67      | 293, 67 |
| Versailles.....         | 201    | 8      | 17     | 4, 52      | 230, 52 |
| Troyes.....             | 215    | 7      | 20     | 4, 09      | 246, 09 |
| Saint-Quentin.....      | 51     | 16     | 235    | 6, 52      | 308, 52 |
| Beziers.....            | 439    | »      | 7      | 2, 11      | 448, 11 |
| Boulogne-sur-Mer.....   | 42     | 5      | 177    | 11, 64     | 235, 64 |
| Boulogne-sur-Seine..... | 274    | 4      | 21     | 4, 49      | 303, 49 |
| Avignon.....            | 196    | »      | 51     | 4, 24      | 251, 24 |
| Lorient.....            | 96     | 92     | 6      | 6, 36      | 200, 36 |
| Caen.....               | 66     | 92     | 6      | 11, 48     | 175, 48 |
| Bourges.....            | 114    | »      | 4      | 2, 68      | 120, 68 |
| Cherbourg.....          | 13     | 125    | 4      | 8, 50      | 150, 50 |
| Clichy.....             | 275    | 6      | 13     | 4, 31      | 298, 31 |

| VILLES                        | VINS   | CIDHES | BIERES | SPIRITUEUX          | TOTAL                 |
|-------------------------------|--------|--------|--------|---------------------|-----------------------|
| Neuilly-sur-Seine . . . . .   | 194 l. | 3 l.   | 49 l.  | 3 <sup>l</sup> , 59 | 219 <sup>l</sup> , 59 |
| Poitiers . . . . .            | 219    | »      | 16     | 2, 20               | 237, 20               |
| Perpignan . . . . .           | 340    | »      | 7      | 4, 49               | 351, 49               |
| Dunkerque . . . . .           | 36     | 1      | 291    | 7, 05               | 335, 05               |
| Saint-Ouen . . . . .          | 287    | 3      | 19     | 4, 49               | 313, 49               |
| Angoulême . . . . .           | 253    | 1      | 7      | 2, 16               | 263, 16               |
| Rochefort . . . . .           | 200    | 1      | 5      | 2, 58               | 208, 58               |
| Asnières . . . . .            | 228    | 5      | 18     | 4, 05               | 255, 05               |
| Montreuil-sous-Bois . . . . . | 269    | 2      | 12     | 4, 01               | 287, 01               |
| Saint-Nazaire . . . . .       | 277    | 15     | 8      | 5, 15               | 305, 15               |
| Roanne . . . . .              | 294    | »      | 5      | 2, 48               | 301, 48               |
| Pau . . . . .                 | 228    | »      | 9      | 3, 27               | 240, 27               |
| Belfort . . . . .             | 227    | »      | 66     | 3, 58               | 296, 58               |
| Montluçon . . . . .           | 248    | »      | 8      | 2, 13               | 258, 13               |
| Vincennes . . . . .           | 219    | 3      | 20     | 3, 60               | 245, 60               |
| Aubervilliers . . . . .       | 286    | 3      | 20     | 5, 03               | 314, 03               |
| Cette . . . . .               | 226    | »      | 4      | 5, 24               | 235, 24               |
| La Rochelle . . . . .         | 246    | »      | 5      | 2, 22               | 253, 22               |
| Le Creuzot . . . . .          | 212    | »      | 9      | 4, 43               | 225, 43               |
| Douai . . . . .               | 46     | 1      | 482    | 5, 27               | 534, 27               |
| Ivry-sur-Seine . . . . .      | 289    | »      | »      | 4, 34               | 293, 34               |
| Pantin . . . . .              | 277    | 3      | 18     | 4, 74               | 302, 74               |
| Valenciennes . . . . .        | 47     | 2      | 476    | 4, 60               | 529, 60               |
| Périgueux . . . . .           | 249    | 2      | 4      | 2, 31               | 257, 31               |
| Courbevoie . . . . .          | 252    | 6      | 19     | 4, 37               | 281, 37               |
| Carcassonne . . . . .         | 390    | »      | 14     | 1, 53               | 405, 53               |

En examinant, sur plusieurs années, la marche de la consommation des boissons alcooliques, Jacques Bertillon (1) reconnut que, depuis 1901, en France, l'alcool est de moins en moins recherché. Par contre le vin gagne de plus en plus. Cette variation inverse se manifeste surtout dans les grandes villes, beaucoup moins dans les campagnes. Le cidre, la bière ne remplissent pas vis-à-vis de l'alcool le rôle prohibitif qui réussit au vin.

L'explication de cet intéressant phénomène réside dans la loi du 29 décembre 1900, qui portait de 156 fr. 25 à 220 par hectolitre d'alcool pur l'impôt sur les eaux-de-vie. Les eaux-de-vie perdent ainsi de leur champ d'action grâce à une loi que le législateur a faite, non comme une arme d'hygiène,

(1) Jacques Bertillon (*la Presse médicale*, du 18 novembre 1911, p. 937). Ce démographe si laborieux est mort en 1922.

mais comme un moyen d'accroître les ressources du budget.

Un exemple significatif des observations de J. Bertillon est fourni par la ville de Troyes (fig. 324). Des statistiques détaillées manifestent le même fait sur un grand nombre de villes. Et enfin, le tableau général ci-dessus montre que la quantité de spiritueux est plus faible là où le vin est de grande consommation, et non là où dominant bières et cidres (Dunkerque, Rennes, etc.).

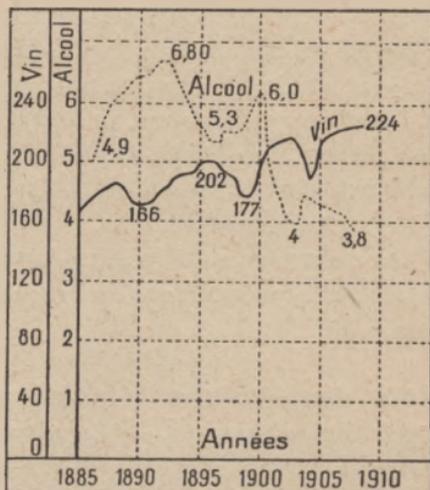


FIG. 324. — Consommation en litres d'alcool et de vin par année et par habitant, à Troyes.

La lutte contre l'alcoolisme doit s'inspirer de tels enseignements; ils ont une valeur pratique indiscutable; il faut, en effet, biaiser avec un ennemi redoutable au lieu de l'attaquer de droit fil. La diminution de la consommation en alcool, l'hygiène spéciale de l'alimentation sont des conditions de prospérité nationale. Aux Etats-Unis, en Suède et Norvège, les Pouvoirs publics ont usé de l'*interdiction absolue*. La loi américaine du *Dry* (1921) s'oppose à l'entrée des spiritueux, elle en poursuit énergiquement la consommation.

Nous savons, hélas! que l'humanité, pour de multiples raisons, les soucis, la misère, ne peut se soustraire longtemps à l'usage, sinon à l'abus, de l'alcool. Aussi, la fraude a-t-elle revêtu, en Amérique du Nord, mille formes astucieuses. Les Etats voisins la favorisent dans un but commercial.

En Scandinavie, la prohibition a produit ce résultat curieux d'augmenter le nombre des ivrognes, plus élevé en 1921 qu'en 1920. Elle sera sans doute atténuée.

Signalons, enfin, le contre-coup de ces mesures dans une île française de la côte N.-E. des Etats-Unis. A Saint-Pierre,

les 7.000 habitants, y compris les sédentaires et les pêcheurs de passage, consommaient l'alcool à doses modérées. En 1919, on y importait 8.300 litres d'alcool à boire, soit *moins de 1,20 litre* par habitant.

Or, depuis la loi du Dry, la fraude constitue des stocks d'alcool à Saint Pierre, et tout ce qui ne peut pas franchir la frontière y demeure, au grand dommage de la population. Ainsi, en 1920-21, la consommation annuelle par habitant s'est élevée à *4,10 litres*. Et les boissons, assurément, sont toutes frelatées.

Les crimes se multiplient dans la malheureuse île, et appellent des précautions de la part du gouvernement français.

**363. Coup d'œil sur la puissance de l'homme.** — *Travail et sports. Le vol humain.* — La puissance de l'homme est une quantité variable, car les modes d'activité musculaire et la durée de celle-ci sont aussi très variables. De plus, cette activité ne saurait être continue. Dans les circonstances les plus favorables, le nombre de kilogrammètres produits par jour, en 8 heures de temps effectif, atteint 300.000. C'est une puissance (par seconde) égale à :

$$\frac{300.000}{8 \times 3.600} = 10^{\text{kgm}}, 4,$$

ou  $\frac{1}{7}$  de H. P., tout au plus. La prolongation de la durée du travail est loin d'être avantageuse. Atwater ne réussit que péniblement à porter la puissance à  $\frac{1}{7}$  H.P. en faisant durer le travail 16 heures par jour et pour une seule fois (§ 140), à grands frais d'énergie d'ailleurs; le plus souvent il obtint  $\frac{1}{10}$  H. P.

Chez l'homme entraîné, par exemple dans le cas d'une marche en montagne, Jules Lefèvre<sup>(1)</sup> a calculé une puissance journalière de  $\frac{1}{4}$  H.P.; elle nous semble excessive.

(1) Jules Lefèvre, *Bioénergétique* (*loc. cit.*, p. 804).

Mais, en réduisant la durée, on augmente la puissance. Ainsi : un homme a élevé un poids de 25 livres (12<sup>kg</sup>,24) à la hauteur de 71<sup>m</sup>,465 en 145 secondes, en se servant d'une corde et d'une poulie.

C'est une puissance de  $\frac{12,24 \times 71,465}{145}$  ou  $\frac{1}{7}$  H. P. seulement (1).

Un scieur de bois a donné 200 coups de scie, et autant de relevées, en 145 secondes. A chaque coup, sa main faisait 0<sup>m</sup>,48726 avec un effort de 12<sup>kg</sup>,24. « Il était déjà fort étouffé, et n'aurait pu continuer plus de trois minutes sans reprendre haleine ». La puissance de cet ouvrier atteint :

$$\frac{0,48726 \times 12,24 \times 200}{145} = 8^{\text{kgm}}, 22.$$

Tenant compte des « relevées » on aura, environ 12<sup>kgm</sup>,5, soit  $\frac{1}{6}$  H. P.

Un homme de 65<sup>kg</sup>,100 s'est élevé à la hauteur de 20<sup>m</sup>,15 en 34 secondes, et s'est trouvé par cela, « hors d'haleine ». La puissance développée, facile à évaluer, se monte à :

$$\frac{65,1 \times 20,15}{34} = 41^{\text{kgm}}, 16.$$

Elle dépasse un peu  $\frac{1}{2}$  H. P. C'est la valeur la plus grande qui ait été obtenue, mais aussi on en voit la faible durée.

Une ascension de deux heures, en montagne, a donné à M. Lefèvre une puissance de  $\frac{45}{100}$  H. P. (valeur calculée).

Nous pourrions encore citer un très grand nombre de valeurs de la puissance humaine : elles prouveraient tout simplement que cette puissance n'est pas une caractéristique du moteur vivant, mais bien plutôt la résultante de tous les éléments, de toutes les variables qui interviennent dans l'expression du travail journalier. La puissance, évaluée pour une

(1) Amontons (*Mém. Acad. Roy. Sciences*, 1703, p. 100).

durée très courte, n'a pas de signification pratique; de même, peut-on dire, la vitesse dans les « courses plates » de 100 mètres, où elle atteint 32 et 33 kilomètres à l'heure<sup>(1)</sup>, n'est pas démonstrative; tandis que la vitesse dans les « Marathon » de 40 à 100 kilomètres témoigne de l'effet de l'endurance et de l'entraînement. On a noté, par exemple comme *vitesse maxima* :

42<sup>km</sup>,780 en 9.443 sec. (Henri Siret, à Londres, 1908),

40 kilomètres en 9.330 secondes (Henri Siret à Paris, le 27 août 1911), et 42<sup>km</sup>,780 en 9.156 secondes (Kolehmainen, août 1920).

C'est une vitesse horaire de 16 kilomètres environ.

Les 100 kilomètres ont été parcourus en 9 heures, soit à 11 kilomètres à l'heure (Littlewood en 1884, Jack en 1909)<sup>(2)</sup>. Il semble que, pour un même coureur, *la vitesse de marche varie en raison inverse de la racine carrée de la distance*. Cette vitesse de marche est parfois d'une régularité parfaite. Ainsi Jean Bouin (vingt-quatre ans, 69 kilogrammes) parcourt 9<sup>km</sup>,721 en 30 minutes, le 17 novembre 1911; et cette vitesse de 19<sup>km</sup>,442 fut à peu près constante en la chronométrant toutes les 169 secondes. Vermeulen, sur la piste de Saint-Ouen (8 juin 1919) parcourt 10 kilomètres en 33' 24",40, soit une vitesse horaire de 18 kilomètres environ. Il fournit les cinq premiers kilomètres en 16' 15"; puis les 6, 7, 8 et 9<sup>e</sup> kilomètres en 3' 20" 20 — 3' 17" 60 — 3' 30" 60 et 3" 27", soit une vitesse légèrement décroissante; le graphique est presque une *droite*.

A l'Olympiade de Stockholm (1912), le fameux coureur Kolehmainen couvrit les 5.000 mètres plat en 14' 36" 3/5, et à celle d'Anvers (1920), le français Guillemot y consacra 14' 55" 3/5; soient, respectivement, des vitesses horaires de 20<sup>km</sup>,534 et 20<sup>km</sup>,098 mètres.

(1) En moyenne, les meilleurs coureurs font les 100 mètres en 11 secondes, soit à une vitesse de 32<sup>km</sup>,727 à l'heure.

(2) Dans une course pédestre de 765 kilomètres, avec *repos périodiques* de vingt-quatre heures, et terminée le 17 mai 1912, Orphé marcha, en moyenne, à 10 kilomètres à l'heure, faisant près de 85 kilomètres par jour.

En *marche forcée*, le temps est plus long. C'est ainsi qu'à cette dernière Olympiade (août 1920), l'italien Frigerio marcha 10 kilomètres en 47' 6"  $\frac{2}{3}$ ; d'où une vitesse de 12<sup>km</sup>,737 à l'heure. C'était magnifique, mais très dur.

On ne sait pas à quelle *puissance réelle* correspondent ces vitesses athlétiques. Des expériences, à cet égard, restent à faire, contrôlées par des mesures énergétiques et des graphiques de fatigue. Dans le cas de Frigerio, la puissance est au moins de  $\frac{28}{100}$  H. P.; elle dépasse  $\frac{30}{100}$  avec Siret, Bouin et Kolehmainen.

Dans de nombreux modes d'activité athlétique et sportive, en un temps très court, il est possible de développer une puissance qui serait extraordinaire si elle se prolongeait. Bien entendu il ne s'agit pas des « tours de force », réels ou apparents, dont beaucoup tiennent à une habile *attitude*, le squelette se disposant de façon à offrir le maximum de résistance. Ce sont là des *efforts statiques* absolument dénués d'intérêt. Et nous concluons cette enquête en disant que, dans un travail de longue durée, neuf à dix heures par jour, les muscles de l'homme ont tout au plus une puissance de  $\frac{1}{7}$  H. P., exactement  $\frac{1}{9}$  de Poncelet. Rappe-

lons, en passant, que la puissance humaine est relative aux périodes de temps effectif, déduction faite des repos.

Mais supposons-la *continue*, à l'exemple d'un moteur industriel. Suffirait-elle à la propulsion et sustentation d'un homme au sein de l'atmosphère, au *vol humain* pour tout dire? — Trois raisons parlent contre la possibilité de faire de l'homme un *volateur*; 1° Sa puissance est trop faible pour assurer sa sustentation dans l'air; 2° Elle exigerait une *surface portante* telle que l'on devrait construire des ailes d'une immense étendue, et pratiquement non maniables; 3° Et même alors il manquerait à l'homme volant la *sensibilité nerveuse de l'aile* qui, sur les couches d'air les plus capricieuses, nuance la prise des surfaces portantes et en règle mathématiquement le mouvement. L'*anthropoptère* me paraît en dehors des lois de la Nature.



## CONCLUSIONS GÉNÉRALES

---

364. Comparaisons des divers moteurs (1). — Le moteur musculaire est probablement un *moteur electro-capillaire*, dans lequel l'excitation nerveuse vient modifier la tension superficielle (§ 16) et produire la contraction (Lippmann, d'Arsonval). Bien des obscurités, toutefois, subsistent quant à la nature de l'agent nerveux et aux origines de la force motrice.

La puissance de l'homme, égale tout au plus à  $\frac{1}{4}$  H. P., ne peut pas soutenir la comparaison avec celle de nos moteurs usuels. Mais la machine humaine a un excellent rendement; elle dépense 8 petites calories environ par kilogrammètre produit, soit un rendement net de 30 0/0 :

$$R = \frac{1}{0,008 \times 425} = 30 \text{ 0/0.}$$

Elle développe, en moyenne, 300.000 kilogrammètres par jour ; c'est une dépense dynamique de :

$$300.000 \times 0^{\text{Cal}},008 = 2.400 \text{ grandes calories.}$$

Ajoutons-y les 2.340 Calories consommées au repos (2), nous aurons un total de :

$$2.400 + 2.340 = 4.740 \text{ Calories.}$$

(1) Consulter le livre intéressant de Reyer : *Kraft*, 2<sup>e</sup> édit., p. 251. Leipzig 1909.

(2) A raison de 1<sup>Cal</sup>,50 par kilogramme-heure, on a, en effet :  
 $1,50 \times 65 \times 24 = 2.340 \text{ Calories.}$

Si la question de *temps*, de puissance, n'intervenait pas, une bonne machine à vapeur consommerait 1 kilogramme de houille pour effectuer le même travail, c'est-à-dire qu'elle dépenserait le *double* environ du moteur animé.

L'homme, l'ouvrier, a une vie active *plus longue* que celle des machines inanimées ; par exemple, la machine à vapeur ne resterait pas « en feu » plus de quinze à vingt ans sans nécessiter une réparation qui équivaut à une résurrection. De plus, « les particularités de la machine humaine sont relatives à son fonctionnement *discontinu* pour réparer sans trêve les effets de la fatigue ; à sa dépense, malgré cela, *continue* et prise sur les *réserves* alimentaires, en sorte que le défaut de combustible ne l'arrête pas immédiatement ; à sa nature *perfectible*, tandis qu'une machine usuelle réalise d'emblée toutes ses qualités : l'entraînement, l'âge, l'hérédité sont des facteurs qui la mettent dans un perpétuel devenir.

« Enfin son réglage est *intérieur* ; il s'adapte à des nécessités invisibles, pour la plupart organiques, dont elle tire le principe de sa conservation. Aussi le travail en *régime libre* est-il le plus adéquat à sa constitution. C'est alors qu'elle trahit cette tendance à l'*économie de l'effort*, suppléant le gaspillage énergétique par l'adresse des mouvements qu'elle gradue et nuance à l'infini.

« Bien rares les moteurs qui approchent, même de loin, de cette perfection mobile<sup>(1)</sup>. »

Cette supériorité s'affirme dans le rendement thermique ; elle serait décisive s'il ne fallait pas, dans la pratique industrielle, faire état surtout de la puissance, de la quantité de travail dans un temps donné, de la rapidité de son exécution ; s'il n'y avait pas, d'autre part, à considérer le prix si élevé des aliments et de la santé de l'homme. Mais ce dernier, là où il faut graduer l'effort, où l'intelligence doit guider l'exécution, reprend tous ses avantages. Les puissantes machines électriques, qui sont d'un rendement de 80 à 90 0/0, transforment l'énergie mécanique d'une machine à

(1) Jules Amar, *le Rendement de la machine humaine*, p. 41, Paris, 1910.

vapeur; leur rendement est donc bien inférieur à celui des muscles.

Les magnétos qui, elles, défient toute comparaison, utilisent une énergie chimique qui coûte très cher.

Aussi bien, tant que l'industrie ne considère pas la *durée* du travail, l'homme est-il pour elle un outil précieux, utilisable sur place, se procurant partout où il vit le combustible qui l'alimentera, au besoin forçant la terre à le lui donner; nos moteurs thermiques n'ont pas toujours cette possibilité.

Son emploi doit être la préoccupation constante des chefs d'industrie, des officiers qui commandent les troupes, des colons qui exploitent l'énergie considérable de milliers d'indigènes<sup>(1)</sup>, de tous ceux qui poursuivent la mise en valeur du travail humain dans les meilleures conditions possibles. Car l'entretien de la machine vivante n'est pas moins délicat que celui des moteurs usuels; il faut éloigner les causes, internes et externes, de dépréciation, notamment la misère physiologique; il faut veiller à l'intégrité fonctionnelle en proportionnant l'effort et la vitesse.

Proportionner le travail, c'est tout le secret des grands rendements et d'une activité saine et parfaite.

**365. Organisation du travail humain:** — Les lois scientifiques du travail humain portent, aujourd'hui, cette perfection à un degré insoupçonné il y a vingt-cinq ans à peine. Elles substituent aux « tours de main » héréditaires dans une corporation, parfois dans une famille, des procédés universels; elles enseignent à chacun, suivant son âge, sa force, son sexe, l'art de produire son maximum d'effet sans grande fatigue; elles font une part plus large à l'*effort intellectuel* dont on aurait tort de ne pas apprécier hautement le prix. L'homme est une machine qui se conduit d'elle-même, se rectifie et perfectionne lentement ses œuvres; la science vient hâter ce progrès et contribuer, par la possibilité d'améliorer les salaires, au bien-être de l'ouvrier. Celui-ci ne peut

(1) A la suite d'une mission au nord de l'Afrique, nous avons pu montrer que les indigènes du Maroc sont plus robustes que ceux des autres régions (Voir *Organisation physiologique du travail*, chap. XI).

évidemment, par de simples tâtonnements, découvrir de lui-même les conditions les plus favorables à l'exécution des travaux dont il est chargé. Des mesures très précises sont indispensables pour mettre en lumière ces *conditions optima*. C'est ainsi que l'étude de la taille des métaux, une des œuvres les plus importantes de Taylor, a coûté plus d'un million de francs et demandé vingt-cinq années de travail<sup>(1)</sup>.

Le chronométrage de la vitesse, la sélection des mouvements utiles à la confection d'un ouvrage déterminé, doivent être effectués dans tous les métiers, afin d'être renseignés sur le *rendement idéal* d'un atelier ou d'une usine.

Mais le système de Taylor est insuffisant au point de vue physiologique. Le savant américain n'avait pas le moyen d'apprécier le degré de fatigue, de connaître la vitesse, le rythme, l'effort qui, pour un travail maximum, n'exigent que la plus petite dépense d'énergie. Et nous insistons sur les conditions physiologiques, car l'industrie n'a pas pour but d'utiliser le plus et le plus vite la puissance humaine, au risque d'altérer la santé ; elle veut, au contraire, la ménager, l'améliorer dans un intérêt durable, tant pour l'employeur que pour l'employé.

On doit donc organiser le travail de l'homme suivant les principes définis plus haut et que ne contredit pas, au fond, la méthode de Frédéric Taylor.

Une telle organisation sera une source de richesses ; elle mettra en valeur, sans excès, l'effort intellectuel et physique des 6.127.323 ouvriers et des 3.319.929 ouvrières que compte la France dans 71 industries différentes, et qui représentent 24 0/0 de la population totale<sup>(2)</sup>. En y ajoutant patrons et militaires, ce sera la moitié de la population qui pourra *normalement* augmenter son « degré d'utilisabilité sociale » (Solvay), faisant preuve d'initiative, de volonté, « d'énergie personnelle »<sup>(3)</sup>.

L'apprentissage, comme nous l'avons montré par l'exemple

(1) Henry Le Chatelier, Préface de *Principes d'organisation des usines* de Taylor (*loc. cit.*), et *Technique mod.* 15 juin 1913.

(2) Résultats stat. du Recens. gén. de la popul. au 4 mars 1906 (Ministère du Travail, 1911 p. 210).

(3) Reyer (*loc. cit.*, p. 400).

du limeur, sera rendu possible et surtout scientifique. Aujourd'hui, il est une chose purement ridicule, sinon criminelle. Même dans le domaine sportif, le lieutenant Hébert porte ce jugement sévère <sup>(1)</sup> : « Dans certains cas on demande à l'organisme de fournir des efforts trop intenses pour sa puissance : ce qui le détériore rapidement. Dans d'autres cas, au contraire, on ne lui fait produire que des efforts trop faibles, c'est-à-dire on l'utilise incomplètement ».

Ce problème de la meilleure utilisation des forces humaines intéresse tout spécialement l'armée; nous avons vu, à cet égard, ce qui a été fait pour l'infanterie allemande. L'art de *marcher* n'est pas tout, cela est évident, mais c'est un facteur décisif. « La catastrophe de Sedan représentera dans l'histoire le triomphe des jambes allemandes <sup>(2)</sup> », a pu écrire le physiologiste Mosso.

366. **Universalité et utilité de la science du travail.** — Le domaine de la mécanique physiologique, de l'*énergétique humaine*, est donc des plus vastes; les principes d'organisation scientifique du travail humain satisfont à l'aphorisme d'Aristote « qu'il n'y a de science que du général » : ils ont un caractère d'universalité que le public n'aperçoit pas de prime abord. Lors de la publication de *Motion Study*, par Gilbreth, on crut que cette science ne devait intéresser que le maçon; mais il apparut à la longue qu'elle s'adressait à toutes les branches de l'industrie. Le premier article de Gilbreth publié dans *Industrial Engineering* de Robert Kent, passa presque inaperçu. Au second, « des demandes de séries parvinrent de l'industrie du fer et de l'acier, des fabriques de chaussures, des établissements d'imprimerie et de reliure et de plusieurs autres industries. Ce fut, ajoute Kent, lorsque nous commençâmes à recevoir ces demandes que nous nous rendîmes compte que nous avions fait quelque chose d'utile, et publié un article d'une valeur surprenante, non pas seulement pour un métier ou un groupe de métiers, mais pour le monde entier <sup>(3)</sup> ».

(1) G. Hébert, *Le Code de la force*, p. 11; Paris, Laveur, 1911.

(2) A. Mosso, *Les exercices physiques*, p. 56 (*loc. cit.*), Paris, 1904.

(3) Préface de *Motion Study* p. XIII.

Avec Sanford Thompson, un brillant mathématicien, Taylor fit plusieurs analyses très complètes de divers travaux : maçonnerie de pierres, briques, béton, ciment ; terrassement ; charpente ; extraction de la pierre, etc.

L'art de travailler est ainsi constitué et fortement établi sur des bases scientifiques. L'industrie y trouve admirablement son compte ; l'apprentissage se fait rapidement à cette école où les leçons de choses sont données au moyen de *cartes* préparées d'avance, et parfois grâce à des projections cinématographiques qui mettent sous les yeux des modèles animés. On imagine tout ce qu'une telle organisation possède de vertu éducative, d'unité, de cohésion, et de ressources.

Mais les objections ne lui ont pas manqué. Et d'abord celle du surmenage. Taylor ne peut y répondre qu'en invoquant son expérience ; il n'y a jamais eu d'accidents sérieux sous sa direction. Mais cela ne doit-il pas être attribué à la sélection ?

Les arguments de cet homme si pénétrant et si habile méritent, ici, que nous les rapportions intégralement :

« Actuellement, il y a une telle demande de main-d'œuvre qu'aucun ouvrier n'est obligé de chômer plus de un ou deux jours, en sorte que les travailleurs les moins bons ne sont pas plus malheureux que jamais.

Au lieu d'éprouver de la pitié pour ceux-ci, on devrait, au contraire, se féliciter et se réjouir que beaucoup d'ouvriers de valeur trouvent au moins la chance de gagner de gros salaires et de marcher vers la prospérité. »

Ces salaires, voici quel en doit être le barème : « Pour les genres de travaux les plus routiniers de l'atelier de mécanique, il est nécessaire de payer des salaires 30 0/0 supérieurs à la moyenne. Pour les travaux ordinaires à la journée, demandant peu d'intelligence ou d'habileté spéciales, mais exigeant de la force musculaire..., il est nécessaire de payer de 50 à 60 0/0 plus cher que de coutume. Pour les travaux demandant une intelligence et une habileté spéciales, en même temps qu'une attention soutenue, mais sans exercice physique bien rigoureux..., l'augmentation doit aller de 70 à 80 0/0. Enfin pour les travaux exigeant à la fois de l'habi-

leté, de l'intelligence, une attention soutenue, de la force musculaire..., cette augmentation doit aller jusqu'à 80 et 100 0/0... Les hommes ne sont pas disposés à faire de leur mieux s'ils ne sont assurés d'une élévation de salaire libérale et durable ».

Et enfin cet aphorisme précieux :

« Toute manœuvre qui a pour but de limiter la production doit être regardée comme un moyen tendant, à la longue, à abaisser les salaires. »

367. — La reconstruction du monde, que la guerre de 1914-18 a rendue nécessaire, impose aux travailleurs de ne point porter atteinte à la loi des rendements élevés. C'est dans leur intérêt ; c'est seulement ainsi qu'ils obtiendront la réalisation de cet idéal : *minimum de présence à l'atelier et maximum de production*.

La durée de la journée ouvrière sera évidemment, comme on l'a dit plus haut, variable avec les professions. Le législateur pourra la fixer selon les espèces, mais d'après les données de la science.

Quant à la journée de huit heures, c'est une hérésie industrielle ; elle sera tantôt excessive, tantôt déficitaire. Il n'y a pas plus de durée uniforme que de similitude dans les métiers.

En vérité, c'est une chose incroyable qu'il existe une science pouvant restreindre ou supprimer le gaspillage d'énergie humaine, et que sa souveraineté ne s'étende pas encore à tous les domaines, que sa puissance bienfaisante ne soit pas employée au profit de la société, à l'avantage des travailleurs. Cependant, la guerre utilise des principes scientifiques de combat, et s'efforce de faire produire à l'homme son maximum d'effet ; les sports (escrime, boxe, gymnastique) se réclament des mêmes principes. Mais nous oublions que le *struggle for life* est essentiel à l'humanité ; assurons donc à l'ouvrier les conditions du meilleur rendement pour qu'il gagne largement sa vie et ne soit pas une charge stérile, un poids mort pour l'employeur ; veillons à la défense de la santé, organisons l'*hygiène sociale*, sans laquelle toute entreprise d'éducation physique serait un accessoire, un

luxé. Les nations robustes ne connaissent pas les fléaux de l'alcoolisme et de la tuberculose au degré qu'ils ont atteint chez nous ; elles ne s'embarrassent ni d'hydrothérapie, ni de gymnastique suédoise ; elles puisent dans une existence active et saine une énergie croissante ; au travail de chaque jour elles empruntent une force nouvelle, comme le géant de la fable sentait renaître la sienne quand ses pieds touchaient la terre.

Le système de Taylor, amendé sous le rapport des conditions physiologiques du travail pour l'harmoniser avec le nôtre, pratiqué par des hommes de tact doués de savoir et de savoir-faire, constitue une des solutions les plus scientifiques du problème social de la main-d'œuvre, des rapports des employeurs avec les employés. Il faut l'adopter en principe, et en étudier les modes d'application, car la science doit travailler, suivant la belle métaphore d'un maître écrivain, « à jeter par-dessus les orages du présent l'arc de paix de l'avenir ».

---

# TABLE DES MATIÈRES

(Les chiffres renvoient aux pages)

---

|                    |      |
|--------------------|------|
| PREFACE .....      | v    |
| AVANT-PROPOS ..... | xiii |

## LIVRE I

### NOTIONS DE MÉCANIQUE GÉNÉRALE

|  |        |
|--|--------|
| CHAPITRE I. — Cinématique et Statique.....   | 1-44   |
| — II. — Dynamique et Énergétique.....        | 44-82  |
| — III. — Résistance des matériaux, machines. | 83-117 |

## LIVRE II

### LA MACHINE HUMAINE

|   |         |
|---|---------|
| CHAPITRE I. — Architecture du corps humain..... | 119-163 |
| — II. — Le moteur musculaire et l'alimentation  | 164-195 |
| — III. — L'alimentation et la dépense d'énergie | 196-233 |

## LIVRE III

### L'ÉNERGIE HUMAINE

|  |         |
|--|---------|
| CHAPITRE I. — Les lois de la dépense énergétique... ..   | 235-263 |
| — II. — Le rendement de la machine humaine               | 264-279 |
| — III. — Effets physiologiques du travail : fatigue..... | 280-301 |

## LIVRE IV

## L'HOMME ET LE MILIEU

|          |   |         |
|----------|---|---------|
| CHAPITRE | I. — Le milieu intérieur.....   | 303-326 |
| —        | II. — Le milieu extérieur : la température.                                     | 327-340 |
| —        | III. — Le milieu extérieur : l'air et l'eau....                                 | 341-357 |
| —        | IV. — Le milieu extérieur : l'air comprimé,<br>les radiations, l'outillage..... | 358-375 |

## LIVRE V

## TECHNIQUE EXPERIMENTALE

|          |   |         |
|----------|---|---------|
| CHAPITRE | I. — Les mesures, instruments, mesures<br>statiques de la machine humaine...  | 377-417 |
| —        | II. — Mesures dynamiques de la machine<br>humaine et travail professionnel... | 418-441 |
| —        | III. — Evaluations énergétiques relatives à<br>l'homme; tables utiles.....    | 442-477 |

## LIVRE VI

## LE TRAVAIL PROFESSIONNEL

|          |  |                    |
|----------|--|--------------------|
| CHAPITRE | I. — Equilibre et mouvement du corps hu-<br>main ; locomotion : marche.....  | 479-513            |
| —        | II. — Le travail professionnel et la locomo-<br>tion : marche ( <i>suite</i> ), course, saut,<br>grimper, ramper, nager..... | 514-556            |
| —        | III. — Le travail professionnel ( <i>suite</i> ) et l'ou-<br>tillage.....  | 557-606            |
| —        | IV. — Le travail professionnel ( <i>suite</i> ).....<br>Travail de la parole et travail intel-<br>lectuel.....               | 607-644<br>644-652 |
|          | Rations alimentaires des ouvriers...   | 652-664            |
|          | Puissance de l'homme. <i>Peut-il voler?</i>  | 664-667            |
|          | CONCLUSIONS GÉNÉRALES.....   | 669-676            |

# INDEX ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES

## A

- Acapnie**, 354.
- Accélération**, 3, 6, 48; — nerveuse, 373.
- Acclimatement**, 334, 369.
- Accommodation élastique**, 140.
- Acide aminé**, 202; butyrique (son rôle alimentaire, 212, 310; — carbonique, 207, 282, 354, 360; — lactique (produit de la fatigue), 289.
- Acidité**, des muscles (fatigué), 289, 295; — du beurre, 212, 310.
- Action** (Principe de l' — et de la réaction), 29; — quantité d' — (synonyme de travail), 113, 561; — spécifique dynamique (de Rubner), 229.
- Acuité des sens**, 316, 462; — auditive, 648.
- Adaptation dite fonctionnelle**, des muscles, 132, 140, 171, 178, 496; — des cartilages, 172; — des os, 129; des organes et de la forme du corps, 147; — de l'intensité respiratoire, 162, 232.
- Adhérence** (d'une surface articulaire au liquide synovial), 141.
- Addition latente** des secousses musculaires, 166, 292, 373.
- Adrénaline**, ses effets, 296.
- Affinité ou potentiel chimique**, 25, 68, 195; — ethnique, 660.
- Age** (Influence sur la résistance des tissus, 148, 179; — sur les fonctions de l'organisme, 119, 195, 314).
- Air atmosphérique**, sa composition, 205, 327; — sa résistance, 345; — comprimé, 358; ses accidents, 360; — confine, 360.
- Aires** (Evaluation des —), 418; — d'un triangle rectangle, d'un trapèze, 419; — d'une ellipse, d'un cercle, d'une parabole, d'une sinusoïde, 420; — d'une courbe plane, 420.
- Albumine**, dite de Lieberkühn, 208, 225.
- Albuminoïdes** (Substances), 190, encore appelées Protéiques, 191; — minimum d' —, 200, 203; — leur rôle dans la production de force musculaire, 289, 653, 657.
- Alcaloïdes**, leur rôle comme aliments nerveux, 210, 309; — toxiques, stupefiants, 362.
- Alcool ordinaire**, 200; — sa valeur alimentaire, 205; — ses effets toxiques, 207, 632; consommation d' — en France, 658; lutte contre l' — 659, 676.
- Alimentation**, définition, 185; — des indigènes, 658.
- Aliments**, sources d'énergie, 66, 110; — conditions qu'ils doivent remplir, 187, 197, 202, 304; — leur classification, 190; — leurs équations de combustion, 207; — thermogénétiques, 303; — nervins ou d'épargne, 209, 303, 306; — de force, 288, 653; — de travail, 227; tableau des —, 197; — séjour des —, 194.
- Alpinisme**, 253, 355, 548, 553, 664.
- Altitude**, sa mesure, 353; — réduite, 351; effets de l' — 352; mal d' — 354.
- Amar** (Loi de Jules —), 259.
- Amplitude** d'un mouvement, 5; — utilité de la diminuer, 633, 641.
- Analyse mathématique**, 254; — des gaz, 452.
- Anémie**, 313, 315.
- Anémomètres**, 346, 390.
- Angle**, de frottement, 77; — de torsion, 89.
- Anisotropes** (corps), 91.
- Antagonistes** (Muscles), 174, 497.

- Anthropoptère**, ou homme volant, 667.
- Apprenti** (Travail d'un), 597.
- Apprentissage** (son organisation), 557, 597, 601, 604, 675.
- Aptitudes professionnelles**, 147, 290, 322; Fiches d' — 326, 634.
- Arborisation nerveuse terminale**, 131.
- Art culinaire**, 194, 658; — du maçon, 635.
- Arthrodynamomètre**, 401, 417.
- Artériosclérose**, 307.
- Articulations du corps**, 35, 122, 140; à charnière, à pivot, à vis, 143; — ovales, 144; — en selle, 145; — sphériques, 145; vitesse des —, 181; — féminines, 117.
- Assimilation** (des aliments), 195.
- Astigmatisme**, 368.
- Athlètes**, métabolisme des —, 220; performance des —, 666, 667.
- Atmosphère** (ses propriétés), 327.
- Atome**, définition, 38.
- Attention**, 300, 322, 633, 634.
- Attitudes**, 322, 374, 480, 485, 555, 593, 627, 630, 640.
- Automatiques** (mouvements), 120, 168, 174, 496, 558.
- Aveugles**, 366, 462, 589.
- Aviation**, ses moteurs, 108; — ses effets physiologiques, 355, 387.
- Avitaminose**, 208.
- Axe instantané**, de rotation, 22, 32, 146; — d'un couple, 33.
- B**
- Bahnung**, 373.
- Bains** (Effets des), 349.
- Balancier**, à une forme d'égale résistance, 89; — à frapper les monnaies, 436.
- Baquetage**, 435, 572.
- Baromètre**, 350, 457.
- Base de sustentation**, 42, 480, 485.
- Beribéri**, 203.
- Bicycle ergométrique**, d'Atwater, 214, 224, 268, 424; — de Jules Amar, 209, 425; — de Langlois, 426.
- Bicyclette**, résistance au roulement, 438; travail dépensé en —, 488, 626.
- Billes**, frottement sur —, 18, 414; —
- vérification des — de bicyclettes, 634.
- Blutage**, 204.
- Bois**, intoxication par certains bois, 262; — résistance du — 86; — travail du —, 607.
- Boissons alcooliques**, 308, 658.
- Bombe calorimétrique**, 66, 191, 193.
- Boxe**, 80, 441, 488, 633.
- Brachyskeles** (Sujets), 152.
- Bras**, — de levier, 32, 34, 97, 172; — activité des — 433, 568.
- Brouette**, 97; manœuvre de la —, 402, 406; 615, 616, 619, — à deux roues, 375, 623, 640.
- Bruits**, influence des — sur le travail de l'homme, 371; — accoutumance aux —, 374; — des outils, 316.
- Buste**, ses proportions, 152, 396; son importance physiologique, 153; son expression mathématique, 158.
- C**
- Cabestan**, sa manœuvre, 102, 435, 568.
- Cabrouet**, sa manœuvre, 402, 406, 615, 616.
- Cacao**, 197, 210, 309.
- Café**, 210, 309.
- Caféine**, 197, 210, 309.
- Caissons** (Mal des), 359.
- Calcul des probabilités**, 379.
- Calorie**, définition de la grande —, 62, 116; — petite —, 116.
- Calorimètre d'Atwater**, 213.
- Canotage**, 633.
- Caoutchouc**, ses constantes physiques, 139.
- Capacité vitale**, 153, 183, 354, 396, 446, 459, 548; — de localisation (du toucher), 461.
- Capsules surrénales** (rôle des), 296.
- Cardiogramme**, 283, 380, 460.
- Carnot** (Principe de), 67.
- Cartes d'instruction** pour les ouvriers, 559, 641.
- Cartilages**, 136, 172.
- Centre**, — d'oscillation, 6; — de percussion, 80; — instantané, 22; — de gravité, 39, 487, 498; — nerveux, 137, 259; — son rôle régulateur, 231, 239, 343 et coordonnateur, 174, 253, 497, 513. 651 et

- fatigabilité, 297, 300, 343, 354, 356 ;  
— des forces parallèles, 33.
- Chaleur**, ses origines, 59 ; — de combustion, 66, 191 ; — par gramme d'aliments, 191 ; — de frottement, 59 ; — humide, 344 ; — de la mine, 358 ; — sèche, 343 ; — solaire, 367 ; — spécifique, 217 ; — de vaporisation, 217.
- Chambre calorimétrique** d'Atwater, 213, 466, 648.
- Champ** (Action d'un) ; — acoustique, 371 ; — électrique, 361, 365, 369 ; — magnétique, 74, 371.
- Charge**, valeur optimum, 242, 244, 250, 252, 537 ; — d'écrasement, 128.
- Chaussure exploratrice** de Marey, 408, 505 507.
- Chaveau**, 111 ; rapport de —, 278, — lois de —, 235, 236 et suiv.
- Cheval-vapeur**, définition, 107, 116.
- Chirographe**, 431.
- Chlorophylle**, 72.
- Choc**, 37, 77 ; — applications du —, 79, 80, 81, 576 ; — inconvénients, 92, 106, 373 ; — amortissement du —, 93, 531 ; — mesure du —, 79, 387.
- Chrono-cyclographe**, 16, 559.
- Chronographes**, 385.
- Chronométrage**, 544, 563, 672.
- Chronophotographie**, son principe, 14 ; — ses applications, 15, 242, 490, 500, 513, 526, 529, 559.
- Chute des corps** (Loi de la), 3, 12, 45 (voir à Saut).
- Chyle**, sa formation, 208.
- Cinématique**, définition, 1 ; — ses lois, 2 ; — ses applications, 559.
- Cinématographie**, principe, 16, 24 ; — applications, 560, 601, 674.
- Cisaillement**, 92 ; — des os, 128.
- Classification des hommes**, sous le rapport physique, 147, 323, et psychique, 316, 634 ; — des métiers, 433, 565.
- Climat** (influence du), 334, 343, 356, 368.
- Coasting**, 276 ; — sa mesure, 277.
- Coca**, 210, 211.
- Coefficient d'âge**, 444 ; — de convection de l'air, 218, 330 ; — de Coulomb, 90 ; — de digestibilité, 191, 193 ; — d'effet utile, 118 ; — de frottement de glissement, 74, 475 ; — de frottement de roulement, 74, 475 ; — morphologique, 158, 326 ; — de perte des machines, 108 ; — de Poisson, 91 ; — de souplesse, 85 ; — thoracique, 152, 160, 326 ; — de transformation de l'énergie, 113 ; — d'utilité d'un vêtement, 339, 347 ; — d'utilité des efforts, 586.
- Coin**, 92, 100.
- Colloïdes**, 119, 130, 137.
- Combustible** des êtres vivants, 185 ; — préféré du moteur musculaire, 223, 227.
- Combustion**, 65, 185 ; — vive, 186 ; — lente de la vie, 186 ; siège de la — vitale, 195.
- Composantes** des efforts, 26, 410, 576.
- Composition** des forces, 26 ; — des mouvements, 18.
- Compression** (force de), 84.
- Compte-duites**, 389.
- Compteurs à gaz**, 153, 446 ; — de vitesse, 388 ; — de pas, 389, 535 ; — d'ouvrage, 389.
- Condiments** (effets des), 310.
- Conductibilité calorifique**, 330, 468 ; — électrique, 139 ; — nerveuse, 168 ; — des vêtements, 335, 470.
- Conservation** de l'énergie, en général, 63 ; — dans le monde vivant, 66, 213 ; — de l'entropie, 69.
- Contractilité** des muscles, 133.
- Contraction musculaire**, 164, 168 ; — isotonique, 168 ; — isométrique, 168 ; — dynamique, 168, 236 ; — statique, 168, 216 ; — volontaire, 133, 248.
- Contracture**, 140, 314.
- Convection** de l'air, 218, 330.
- Corps humain** (forme du), 147 ; — homogène, 39, 59 ; — hétérogène, 39, 479 ; architecture du —, 119, 323.
- Corpulence**, sa mesure, 157.
- Cosinus**, définition, 5 ; — directeur, 8, 28 ; — table des — 477.
- Couche invariable**, 351.
- Couleurs** (effets des), 362, 366, — 368.
- Couloir à ventilation**, 467.
- Coulomb**, rapport de —, 556 ; coefficient de —, 90.
- Couple** de forces, 33.
- Courants d'air**, 345, 346 ; — de Foucault, 74, 221.
- Courbe** d'un mouvement, 10 ; — spi-

- rale, 144 ; — myographique, 165 ; — respiratoire, 280 ; — de la fatigue, 291 ; — des erreurs, 379 ; — logarithmique, 161, 260.
- Course**, 211, 346, 524, 666 ; — en flexion, 525, 526.
- Couscous**, 197.
- Couture**, 629, 631.
- Crampe** (des écrivains), 631.
- Crescographe**, 371, 384.
- Cric**, 436.
- Crise d'Inanition**, 161.
- Croissance du corps**, 160, 200, 202, 204, 212, 306, 310 ; — des plantes, 371, 384.
- Curare** (Action du), 133, 362.
- Cycle fermé**, 64 ; — réversible, 69 ; — irréversible, 70, 114 ; — de Carnot, 70, 114 ; — musculaire, 114.
- Cyclographe** de Scott, 438 ; — de Gilbreth, 16.
- Cycloïde**, 21.
- D**
- Dactylographes**, 437 ; travail des — 629.
- Daltonisme**, 316, 319.
- Danse** (mouvements de la), 15, 633.
- Décomposition** des mouvements, 18 ; — des forces, 26, 576.
- Déformations**, 2, 25, 28 ; — élastiques, 83, 84 ; — professionnelles, 147, 151.
- Dégradation de l'énergie**, 70, 74.
- Degrés**, de fatigue, 233, 286, 291 ; — de liberté, 34, 35, 102, 140.
- Démarrage**, 106, 475 ; — des muscles, 239, 242, 244, 276, 301.
- Démographie**, 379.
- Densité**, du corps humain, 154 ; — de l'eau de mer, 349, 531.
- Dépense** des moteurs, 109 ; — statique, 110 ; — dynamique, 110 ; — musculaire, 200 ; son analyse, 215 ; — physiologique minimum, 219, 221, 228, 331, 348, 350 ; — économique, 242, 246, 251, 537 ; — nerveuse, 244, 248, 251 ; variations de la —, 230 ; rapport des — motrice et résistante, 279.
- Déplacement de l'équilibre** (Loi du), 67.
- Dérivée**, définition, 3 ; — de l'énergie élastique, 180.
- Désassimilation**, 195.
- Dévers de la vole**, 49, 509.
- Diapason**, 13, 16 ; électro —, 316, 387.
- Diaphyse**, 122.
- Diarthroses**, 141.
- Diastases**, 189.
- Diastole**, 283, 548.
- Dicrotisme du pouls**, 284.
- Diététique**, 195.
- Dimensions**, formules de — 116 ; — des outils, 374.
- Diminution sénile**, de la taille, 151 ; — du poids, 157 ; — de la force, 178.
- Dissociation de l'oxyhémoglobine**, 195.
- Division du travail**, 375, 563.
- Douleur n'est pas fatigue**, 291, 297, 431.
- Dynamique**, définition, 1, 45 ; — du corps humain, 489.
- Dynamomètres**, principe des —, 25, 399 ; — de Régnier, 177, 400 ; — de Bloch, 400 : — enregistreurs de Marey, 401, 424 ; — de Waller, 401 ; — emploi des —, 399.
- Dyne**, 37, 53, 115.
- Dyspnée**, 283, 295.
- E**
- Eau**, résistance de l' —, 349 ; — chaleur de vaporisation de l' —, 217 ; — effets de l' —, 188, 304, 343, 349 ; — perte calorifique dans l' —, 349, 470.
- Echantillonneur respiratoire**, 270, 452.
- Echauffement** des muscles au travail, 237, 238, 242 ; — du corps, 228, 290 ; — de l'air respiré, des aliments absorbés, 217.
- Economie** comme loi naturelle, 87, 89, 132, 147, 171, 172, 229, 244, 263, 540.
- Ecrasement d'os**, 128.
- Ecriture**, 631, 643.
- Edlund** (expérience d' —), 65.
- Education respiratoire**, 281, 650 ; physique, 325, 633, 667, 673.
- Effort musculaire**, 25, 105 ; — statique, 56, 76, 110, 112, 180, 296,

- 433; — de contraction, 169; — dépense d' — statique, 235, 236; — évaluation d'un —, 414; — enregistrement d'un —, 402; — tranchant, 92; — intellectuel, 634, 671.
- Einstein**, 24.
- Elasticité**, définition, 83; — sa limite, 83; sa fatigue, 84, 140; — lois de l' —, 84, 92; — rôle de l'élasticité, 84, 140.
- Elastiques** (corps), 79; — leur avantage, 84, 140, 374, 529; — retards —, 84, 140.
- Electrique** (Champ); — effets sur l'organisme, 369 et sur les odeurs de l'air, 361; — (Courant); — effets sur les muscles, 369; — diapason, —, 387; — signal — de Deprez, 387.
- Élévation de lardeaux**, 423, 571.
- Embolles**, 360.
- Emotion**, 321.
- Emotivité féminine**, 321.
- Enclume**, 81.
- Endurance**, 296, 309; — respiratoire, 158.
- Energétique**, 69, 562, 673.
- Energie**, définition, 59; — cinétique ou potentielle, 59; — conservation de l' —, 64; — intérieure, 64; — libre ou liée, 71, 227, 290, 305; — formes de l' —, 70; — élastique, 92; — nerveuse, 72, 294, 301; — intellectuelle, 72; — vitale, 72; — vibratoire, 73; — dégradation de l' —, 74; restitution de l' — 241.
- Enfants** (travail des), 148, 513, 597.
- Engrenages**, 23.
- Ennui** (Effet de l' —), 321.
- Enquêtes alimentaires**, 443, 652, 654.
- Enregistrement**, méthode, 12, 380.
- Entraînement**, ses causes, 140, 276, 287, 322, 540.
- Entropie**, 67.
- Envergure du corps**, 152, 396.
- Épargne** (Aliments d'), 209, 308.
- Epicycloïde**, 21.
- Epiphyses**, 122.
- Equation**, — d'un mouvement, 2, 6, 9; — d'une combustion, 207; — personnelle, 168, 259, 300, 315, 548, 629, 634.
- Equilibre**, définition, 29; — contraint, 29, 83, 480; — stable, ins-  
table, indifférent, 42; — du corps, 480; — nutritif, 205.
- Equivalent mécanique** de la calorie, 63, 115.
- Équivalence** (Principe de l' —), 62.
- Erg**, 53, 115.
- Ergographe** (Principe d'un —), 248, 291, 301, 423; — de Hall, 272; — de Mosso, 249, 426; — de Jules Amar, 431; — de Storey, 420; — de Trèves, 429; — de Capobianco, 430; — de Marey, 424.
- Ergogramme**, 249, 291.
- Ergomètres**, de Laulanié, 424; — d'Atwater et Benedict, 221, 268, 425; — de Jules Amar, 425; — de Langlois, 426; — divers, 426.
- Erreurs dans les mesures**, 377; — absolue, 377; — relative, 377; — fortuite, 378; — systématique, 378; probable, 379.
- Escalier**, — d'un ergogramme, 292; — ascension et descente d'un —, 519, 522.
- Escarpolette** ou balançoire, 50.
- Escrime**, 496, 633.
- Essoufflement**, ses causes, 282, 314.
- Esthésiomètre**, 300, 460.
- Étalonnage des efforts**, 414, 581.
- État hygrométrique**, 341, 471.
- Ethniques** (Influences), 323, 325, 338, 356, 367, 652, 658;
- Eudiomètre** de Laulanié, 464; — de Bonnier et Mangin, 454.
- Euler** (Formules d'), 256.
- Excitants**, définition, 119; — cellulaires, 210, 276, 322, 366, 371.
- Excitation motrice**, 137; — volontaire, 166, 244, 248; — thermique, 333.
- Explosifs**, leur caractère, 186.

## F

**Faim**, 161, 310.

**Fatigue**, 107, 166, 180, 235; caractères de la —, 271; causes de la —, 295, 356; — intellectuelle, 297, 644; — degrés de —, 258, 265, 293, 295; — sensation de — 258; — courbe de la —, 291; — élastique, 84, 92, 140.

**Fayolisme**, 564.

**Féminisme**, 321, 606.

**Femme**, 311, 315, 321, 487, 606, 631, 634, 642.

- Fibre**, invariable, 86, 89; — nerveuse motrice, 138; — musculaire striée, 130.
- Fiche d'aptitudes**, 326, 634.
- Pick**, expérience de — et Vislicenus, 224, 272; — loi de l'allègement de —, 251.
- Fin**, finissage, 316, 535.
- Fléchisseurs** (rôle économique des), 420.
- Flexion** (lois de la), 86.
- Flux stationnaire**, 110, 191.
- Foie**, source de glycogène, 208, 227.
- Fonction d'une variable**, 9.
- Foot-ball**, 633.
- Forces**, 24, 35; — extérieures et intérieures, 31; — composition des —, 26; — parallèles, 33; — de liaison, 29; — instantanées, 37; — vives, 36, 105; — centrales, 47; — occultes, 73; — centrifuge et centripète, 49; — vitale, 73; — chimique, 63; — élastique, 85, 194; — musculaire, 25, 168, 174; — rénale, 177; — réduction des —, 31; — indépendance des —, 28; — travail des — 294.
- Formes d'égale résistance**, 89; — des muscles, 131; — du corps humain, 147, 479; — des outils, 374.
- Formule de Chauveau**, 238; — de Meeh, 155, 397; — de Laplace, 351; — de Poncelet, 422; — de Dubois, 155; — de Walker, 158; de Amar, 547, 555; — de dimensions, 116; — de Benedict et Harris, 220.
- Foudre** (effets de la), 369.
- Fractionnement**, principe du — de la charge, 245, 274.
- Frein**, de Prony, 75, 110, 238, 426; — à poids de Laulanié, 424; — ergométriques, 214, 221, 425.
- Fréquence des mouvements**, 5, 244.
- Frottements**, 30, 74; — de glissement, 74, 473; — de roulement, 74, 415, 475; — magnétique, 74, 221.
- Fumées**, 363; leur précipitation, 364.
- G**
- Galilée**, 87, 98, 294, 560.
- Gaspillage**, 244, 558, 597, 641, 651.
- Gauchers**, 496, 511, 602, 613.
- Gaz**, effets des — délétères, 360; — analyse des — respiratoires, 452.
- Geographie**, 189.
- Gilbreth** (règles de), 255, 322, 324, 558, 563, 623, 635 et suiv.; chronocyclographe de —, 16, 559.
- Glaces**, travail de polissage des —, 608.
- Glissement d'un solide**, 91; — frottement de —, 74, 475.
- Globules rouges**, 195, 352.
- Glucose**, 38, 227.
- Glycérine**, son rôle alimentaire, 306.
- Glycogène**, 208, 227, 228.
- Graisses alimentaires**, 192, 193, 312.
- Graphique**, 9; — méthode —, 13, 380.
- Graphologie**, 632, 633.
- Gravitation**, définition, nature, 25.
- Gravité** (Centre de); — sa définition; 39; — sa détermination, 41, 480; — axe ou ligne de — 39, 80, 487; — mouvements du centre de —, 46, 489; — Centres de — des segments du corps, 498.
- Grimper**, 501, 530.
- Grossesse** (influence de la), 315, 487.
- Gymnastique**, 633, 676.
- Gyrographe Amar**, 437.
- H**
- Haltères** (épreuve aux), 236, 287, 296.
- Haughton** (Loi de), 296; — rapport de —, 556.
- Hélice**, 16.
- Hémoglobine**, 195, 355.
- Hérédité**, 120, 129, 168, 213, 670.
- Heures**, de repas, 187, 195, 261; loi de huit — 675.
- Homéothermes**, 201.
- Homogènes**, corps —, 39, 41, 59; formules —, 117.
- Hooke** (Loi de), 85.
- Humidité**, relative, 341; — des filatures, 342.
- Hydrates de carbone**, 192, 193; — rôle économique des —, 223, 227, 261, 657.
- Hygiène industrielle**, 287, 303, 360; — sociale, 324, 675; — alimentaire, 195.

**Hygromètre** de Crova, 344, 471.  
**Hyperbole** équilatère, 161.  
**Hypertrophie** fonctionnelle, 288.  
**Hypocycloïde**, 21.

**Immédiat**, principe —, 190; — composition —, 196.

**Impulsion**, 51, 529.

**Indépendance** des forces, 28.

**Inanition**, 160, 310; — minérale, 188.

**Indice**, d'endurance respiratoire, 158; — de Pignet 159; — barrique, 160.

**Indigènes**, leur régime, 658, 669, 671.

**Inertie**, principe de l' —, 24, 106; — rôle de l' —, 37, 518; — intellectuelle, 37, 300.

**Influx nerveux**, 168.

**Inhibition**, 296.

**Intelligence**, son activité, 297, 651; — sa fatigue, 299, 634; — son rôle professionnel, 105, 318, 324, 684, 671.

**Invalides**, 378, 417, 589, 602.

**Invariant**, 64.

**Ions**, 327, 355, 369.

**Irréversible**, phénomène —, 70; — cycle —, 113.

**Irritabilité**, 119.

**Isodynamie**, 224, 226.

**Isoglucose**, 225, 226.

**Isométrie**, 168, 401, 417.

**Isotonie**, 168.

**Isotropes** (corps), 91.

## J

**Jet**, amplitude, portée du — 46.

**Jeune**, 160, 187, 310, 315; — professionnel, 161.

**Joule**, 116.

**Journée ouvrière**, 263, 539, 675.

## K

**Kola** (Noix de), 210, 308.

## L

**Lait**, 194, 198, 202, 204, 322.

**Lavoisier** (Relation de), 286.

**Le Chatelier** (Loi), 67.

**Leviers**, leur théorie, 95; — de l'organisme humain, 121, 173.

**Liaisons**, 29, 96; — complètes, 96, 142.

**Liens élastiques** (Rôle des), 93.

**Lineur**, mouvements du —, 6; — travail du —, 265, 411, 433, 576.

**Locomotion**. Organes de la —, 119; étude de la — terrestre, 480; 501; — aquatique, 531.

**Lois de Le Chatelier**, 67 —; de Listing, 145; — de Newton, 201, 260, 288, 329, 466; — de Stefan, 339, 465; — des surfaces, 155, 230; — du repos, 259, 262, 288; — des moindres carrés, 379; — de la contraction musculaire; — de la dépense énergétique, 218; — de similitude, 174; — d'un phénomène, 9; — du minimum, 263; — de Haughton, 296; — de Jules Amar, 259, 262, 288; — de Gauss, 379; — de Fick, 251; — de Schwann, 170.

**Lumière**, action de la —, 365.

**Lysine**, 202.

## M

**Machines** simples, 95; — de l'industrie, 104; — humaine, 119, 669.

**Machinisme**, 375.

**Maçon**, travail du —, 635.

**Macroskèles** (sujets), 152.

**Malgreur**, ses effets, 156, 158, 230.

**Maladies**, de carence, 203.

— des aviateurs, 355, 357.

— des caissons, 359.

**Manivelle**, définition de la — 101; travail à la —, 435, 569, 570.

**Manutention** de gueuses de fonte, 542, 564.

**Marathons**, 666.

**Marche**, des moteurs, 105; de la machine humaine, 259; — à vide, 276; — de l'homme, 246, 272, 480, 501 et suiv.; — en flexion, 510, 515, 626; — ascendante, 519, 548, 552; — descendante, 522, 555; — pathologique, 519; — forcée, 527, 545, 667; — des enfants, 513; dépense de la —, 533.

**Marey**, tambour de —, 13, 380; expériences de —, 93, 172; — chaussure de —, 408; — dynamographe, 423.

**Marteau**, 80, 436, 574, 640.  
**Massage**, 287, 292, 319.  
**Masse**, 35, 37; — du corps humain, 157, 200.  
**Matériaux**, résistance des —, 2, 83; — vivants, 117.  
**Maté**, 210.  
**Mayer** (Principe de), 62.  
**Mécanicien** (travail du), 604.  
**Mécanique générale**, 1; — rationnelle, 1; — appliquée, 1.  
**Mécanismes**, 23, 105.  
**Mesures**, art des —, 377.  
**Métabolisme**, 186, 288, 290; — basal, 219, 311, 334.  
**Métapsychique**, 73.  
**Métaux** (Taille des), 604, 672.  
**Méthode**, graphique, 12, 380; — des rations d'entretien, 205, 442; — de l'oxygène, 205, 444.  
**Mètre-kilogramme**, 440, 517, 533.  
**Métronome**, 50, 384.  
**Micelles**, 130.  
**Microrespiromètre**, 298.  
**Milieu**, intérieur, 303; — extérieur, 204, 230, 327 et suiv.  
**Mineurs**, milieu des — 357; — maladies des —, 358.  
**Minimum**, proteique, 200; hydro-carbone, 202, 228; loi du — 263.  
**Mises en train**, d'une machine, 100; — des muscles, 239, 241, 259, 294, 301, 630.  
**Mnémogrammes**, 293.  
**Modèle réduit**, 194.  
**Module de rigidité**, 89; — de torsion, 89; — de Young, 85, 126.  
**Molécule**, 37.  
**Moelle épinière**, 139.  
**Moment d'une force**, 32, 34; — d'inertie, 58, 498; — d'inertie minimum, 80; — de stabilité, 44; — tordant, 89; — de rotation, 172, 493.  
**Morales** (influences), 321, 640.  
**Morphologie dynamique**, 323.  
**Mort** (définition), 162; — par froid, 335.  
**Mosso**, ergographe de — 249, 426; — myotonomètre de —, 133.  
**Moteurs**, animés, 105, 107, 562; — Diesel, 114, 378; — à explosion, 114, 164, 275; — musculaires, 130, 164; — Gnome, 108; — à combustion interne, 108; — électriques.

240; — hydrauliques 240, 275; comparaison des —, 669.

**Mouvement**, sa forme, 2, 5; — vibratoire, 5, 180; — de translation, 17; — de rotation, 18; — hélicoïdal, 18; — parabolique, 46; — alternatif, 107; — perpétuel, 107, 114; — automatique, 168, 496, 558; — types, 000; — des projectiles, 45, 490; — du centre de gravité, 50, 489; — musculaire, 249, 491; — des membres, 17, 492; — utiles, 498; — inutiles, 498; — transmission du — 23; — composition des —, 18.

**Myographie**, 382.

**Myophone**, 166.

**Myotonomètre**, 130, 320.

## N

**Nager** (Du), 19, 349, 531.

**Nègres**, 172, 189, 338, 367, 368.

**Nerfs**, 137; — leurs lésions, 175.

**Nerveux** (voir *centres, énergie et dépense* —); et 667.

**Nervins** (aliments), 209, 308, 309.

**Neurone**, 137, 167.

**Newton** (Lois de), 201, 260, 288, 329, 466.

**Noyau** (de la cellule), 195, 289.

## O

**Obèse**, 157, 158; — énergie dépensée par les — 230, 332; sang des —, 315; — marche des —, 486, 487.

**Obscurité** (influence de l'), 366.

**Oeil** (fatigue de l'—), 364, 366.

**Olympiade**, 530, 533, 666, 667.

**Ondes de Herz**, 371.

**Oreille** / limite de perception, 648 (voir *Ouïe*).

**Organisation scientifique** du travail, 558, 604, 635, 671.

**Os**, architecture des —, 121.

**Oscillations**, pendulaires, 49; — du corps, 511, 570, 575, 593, 612, 639.

**Oscillomètre de Pachon**, 284, 286, 460.

**Oscillographe**, 387.

**Osséine**, 121.

**Ostéomalacie**, 129.

**Ostéopsathyrose**, 129.

**Ouïe** (Rôle de l'—), 315, 316, 589.

**Outils**, machines —, 105; — choix des —, 374, 556, 604, 609, 640

**Ouvriers**, classification des —, 322, 323, 634.  
**Oxydases**, 186.  
**Oxyde de carbone**, 360, 363.  
**Oxygène**, méthode de l' — 205, 444 ;  
 — naissant, 195 ; — fixation d' —  
 sur les globules du sang, 352.  
**Ozone** (effets de l'), 369.

## P

**Papier** (couleur favorable à la vue), 368.  
**Parabole**, 12, 20, 47, 89, 257, 420, 490.  
**Paramètre**, 95.  
**Parole** (travail de la) 441, 644.  
**Patinage**, 52.  
**Pédale**, dynamométrique, 438, 441 ;  
 — de bicyclette, 626 ; — de machine, 628.  
**Pellagre**, 203.  
**Pelle** (travail à la), 609 et suiv.  
**Pendule**, simple, composé, 49, 504 ;  
 — synchrone, 80.  
**Percussion**, 77, 80, 436.  
**Périmètre thoracique**, 152, 396.  
**Période**, 5 ; — latente, 165.  
**Périodicité** de la contraction, 179.  
**Périoste**, 130.  
**Perspiration**, 214, 289, 343.  
**Pesanteur**, 25, 36, 479 ; son emploi, 637.  
**Phase** d'un mouvement oscillatoire, 6 ; — du saut, 529.  
**Phonie**, 648.  
**Phosphore** (métabolisme du), 289, 299.  
**Photographie** des mouvements, 16, 490, 513, 559, 601.  
**Pianiste** (travail du), 437, 630, 632.  
**Pieds** (appui des), 484, 485, 508, 525, 640.  
**Plétinement**, 545.  
**Pignon**, 23.  
**Piment**, 210, 212, 308.  
**Plan incliné**, théorie du — 98 ; — marche sur —, 519, 522, 552.  
**Plancher dynamographique**, 409, 505.  
**Planimètres**, 55, 421 ; — d'Amsler, 421 ; applications, 422.  
**Plasma musculaire**, 131.  
**Pneumographes**, 280, 380, 407.  
**Poids** du corps, 157, 398 ; — des membres, 498.  
**Poing** (coup de), 80, 128, 633.

**Points morts**, 23, 109.  
**Poisons** musculaires, 295, 318 ; — nerveux, 308, 313, 360 ; — de la sueur, 313, 343, 360.  
**Polypnée thermique**, 332.  
**Poncelet** (formule de), 422 ; — définition du —, 107.  
**Porte-plume dynamographique**, 631.  
**Potentiel**, électrique, chimique, 68.  
**Poulie**, 23, 102, 424, 572.  
**Pouls**, 283, 459, 547.  
**Poussières** (influence des), 363.  
**Pouvoir calorifique**, 191, 193, 208 ; — émissif, 329, 466.  
**Pression**, du sang, 266, 284, 460 ; — de l'atmosphère, 345, 350 et suiv. (voir *Air*) ; — du corps, 484.  
**Principe** des forces vives, 56, 105 ; — de l'allègement, 261 ; — immédiat, 190 ; — du parallélogramme, 19, 577.  
**Projectiles** (voir *Mouvement*).  
**Protéiques** (voir *Albuminoïdes*).  
**Protoplasma**, 30, 119, 131, 192.  
**Psychographe**, 316, 462.  
**Psychologie**, 73, 464, 564, 644.  
**Psychromètre**, 473.  
**Puisage de l'eau**, 435, 573.  
**Puissance** d'un moteur, 107 ; — de l'homme, 441, 664 ; — maximum, 256, 665 ; — motrice de Carnot, 61 ; — massique, 108 ; — vive, 57.

## Q

**Quadratures**, 55.  
**Quantité** de mouvement, 51.  
**Quotient respiratoire**, 207, 225, 233, 259.

## R

**Rabat**, 6, 433, 608.  
**Rachitisme**, 129, 203.  
**Radian** (définition du), 4.  
**Radiation**, 70, 72 ; — son action, 353, 365 ; — de corps humain, 218 (voir *Rayonnement*).  
**Radioactivité**, 73, 189, 203, 327.  
**Raideur**, des cordes, 82, 435 ; — des corps solides, 85 ; — des mouvements, 287, 557, 593, 629.  
**Ramper** (Du), 531.  
**Rapport** de Chauveau, 278 ; — de Coulomb, 556.

- Rations alimentaires**, 196; — d'entretien, 199; — leurs variations, 200; — leur évaluation, 205, 442; — d'été, d'hiver, 201. — professionnelles, 652.
- Rayon de giration**, 58, 498.
- Rayonnement**, des sources de lumière, 365; — du soleil, 367f — du corps humain, 201, 218, 329, 338, 466.
- Réactions**, temps de (voir *Reflexes*), et 318; — de la vie, 195, 288.
- Récepteur d'une machine**, 105.
- Réflexes**, actes —, 164; — durée des —, 168, 318, 386.
- Refroidissement du corps** dans l'air, 346; — dans l'eau, 349.
- Régime calorifique**, 201, 330; — alimentaire, 261, 442, 652.
- Regnault**, formule de —, 217; — tables de —, 341, 471.
- Règle à calcul**, 605.
- Régulateurs**, 106.
- Régulation**, physique, chimique, 231, 332.
- Relation** (voir *Formule*); de Benedict et Harris, 220; — de Lavoisier, 286.
- Rémouleur** (travail du), 628.
- Rendement** des moteurs, 109; — brut, 113, 276; — net, 113, 264, 266, 274; — de la machine humaine, 264, 269, 669; — organique, 113, 115, 277; — maximum, 113; — essais de — 268, 277; — variations du —, 271, 276.
- Repartition** des forces, 35; — des masses, 39, 480, 486, 518; — des heures des repas, 194, 261.
- Repas** (voir *Repartition*).
- Repos**, loi du — (voir *Loi*); — hebdomadaire, 301, 321.
- Reserves alimentaires**, leur formation, 199, 209; — d'oxygène, 293.
- Résistance** des matériaux, 2, 83; — à la rupture, 85; — transverse, 92; — des fluides, 45, 81, 345, 349, 532; — du squelette, 88, 126, 667; — des muscles, 130, 132; — des nerfs, 139; — des cartilages et tendons, 136; — du corps humain, 147; — passive, 74, 438; — électrique, 369.
- Résonance**, 95, 647.
- Respiration**, son réglage, 232; — artificielle, 370; gaz de la —, 445; gêne de la —, 283.
- Retard élastique** (voir *Elastique*).
- Retours à vide**, leur influence sur le travail, 246, 537, 544, 595.
- Reversibilité**, 69, 118.
- Rones à chevilles**, 102, 270, 440, 566; — pénitentiaires, 567; — dentées, 23.
- Roulement**, 21 (et voir *Frottements*).
- Rupture** (voir *Resistance*).
- Rythme du travail musculaire**, 181, 249, 250, 270, 641; — normal, 181, 270, 592; — des respirations, 281, 314, 459, 588; — des pulsations, 284, 459, 588; — de la vie, 321; — des sons, 371, 588; — des pas, 516.

## S

- Salaires**, 324, 559, 563, 565, 643, 674.
- Saut**, 490, 501, 527.
- Scie**, 6, 433; — travail à la —, 604, 608.
- Scorbut**, 203.
- Sécateur**, 410, 416, 432, 607.
- Sécheresse** (voir *Humidité*).
- Secousse musculaire**, 164.
- Sécrétion**, des muscles, 267; — psychique, 658.
- Segment anthropométrique**, 157.
- Sélection des ouvriers**, 322, 323, 543, 548, 564, 634, 644, 672, 674.
- Sels minéraux**, 188, 208, 212.
- Sens**, musculaire, 259; — de la résistance, 248, 251, 259, 297; — rôle des —, 315, 380, 589.
- Sensibilité**, définition, 120; — tactile, 290, 300, 460, 667; — féminine, 321; — à la fatigue, 258.
- Sexe** (Influence du), 121, 127, 129, 147, 149, 153, 178, 230, 315, 526, 532.
- Similitude**, 183.
- Sinusoïde**, 10, 13, 420.
- Sociale** (Hygiène), 324, 675.
- Soif**, 290.
- Soja**, 199.
- Soleil** (Action du), 365.
- Solvay** (Instituts), 443, 654.
- Sommeil** (Influence du), 320, 482, 513.
- Son**, musculaire, 166, 179; — effets du —, 371.
- Sonnettes**, 434, 435, 571.
- Soupape respiratoire**, 206, 445.
- Souplesse** (voir *Coefficient*).

**Sous-alimentation**, 162, 220, 655.  
**Sphygmographe**, 284, 381, 460.  
**Sphygmomanomètre de Potain**, 284.  
**Spirilueux**, 306, 659, 663.  
**Spiromètre**, 205, 446 : — de Tissot, 447, 459.  
**Sports**, 238, 441, 498, 633, 675.  
**Squelette** (voir *Os*).  
**Stabilité de l'équilibre**, 42, 485 ; — d'un édifice, 43 ; — du corps, 43.  
**Stations du corps humain**, 151, 480 et suiv. ; — favorables, 488.  
**Stationnaire**, régime, 201 ; — flux, 110, 180.  
**Statique**, 1, 29 ; — du corps humain, 480 ; — pathologique, 487.  
**Stéréochimie**, 39, 195.  
**Stérilisation**, des aliments, 204.  
**Stétophane**, 397.  
**Stupefiants**, 306, 307.  
**Surfaces des corps**, 154, 397 ; — loi des —, 230 ; — actions de —, 350.  
**Surmenage**, 195, 261, 280, 297, 314, 364, 635, 674.  
**Symphyses ou Synarthroses**, 141.  
**Syndicats**, 325.  
**Synovie**, 141.  
**Système articulé**, 23, 479 ; — stationnaire, 110, 201 ; — nerveux, 120 ; — d'unités, 115 ; — C. G. S., 37, 115 ; — de Taylor, 375, 542, 558, 563, 604, 609, 634, 642, 672, 676 ; — Amaryen, 644, 676 ; — sec (*dry*), 163.  
**Systole**, 283, 548.

## T

**Tabac** (Action du), 362.  
**Tables de Regnault** (voir *Regnault*) ; — trigonométriques, 476 ; — des aliments usuels, 197 ; — des boissons alcooliques, 659, 661.  
**Tachyphagie**, 194.  
**Taille humaine**, 149 ; — sa mesure, 394 ; — des métaux, 604, 672.  
**Tambour de Marey** (voir *Marey*).  
**Taylor** (voir *Système*) et VII.  
**Technique expérimentale**, 377.  
**Température absolue**, 68 ; — du corps humain, 121, 217 et ses variations, 218, 223, 290, 329, 379 ; — des ateliers, 33 ; — des mines, 351 ; — effets généraux de la —, 328 ; — limites extrêmes de la —, 334.

**Temps**, 21 ; — sa mesure, 384 ; — d'Einstein, 24.  
**Ténacité**, 85.  
**Tendons**, 136 ; — d'Achille, 136, 172, 483.  
**Tension superficielle**, 30, 669 ; — élastique, 94 ; — de vapeur, 341, 472 ; — artérielle, 359.  
**Terrassements**, 609, 612.  
**Tétanos physiologique**, 166, 180.  
**Tête** (mouvements de la), 479.  
**Thé**, 208, 308.  
**Théobromine**, 212.  
**Théorème des aires**, 52, 489 ; — de d'Alembert, 96.  
**Thermochimie**, définition, 66.  
**Thermodynamique**, 69.  
**Thermo-endomose**, 333.  
**Thermogénèse**, 111, 232, 350 ; — ali-ments de —, 209, 290, 304.  
**Thermomètre électrique**, 218.  
**Thoracographe**, 152, 396.  
**Tir**, des projectiles, 45 ; angle du — 47.  
**Tonicite**, 133.  
**Tonogrammes**, 281, 446, 459, 650.  
**Tonus**, cause du —, 120, 131, 133 fonctionnel, 297.  
**Torsion**, 89 ; — des os, 128, 129.  
**Toxiques**, 210, 295, 306, 313.  
**Toucher** (Rôle du), 316, 589.  
**Tour**, 605.  
**Traction des corps**, 84 ; coefficient de —, 77, 476.  
**Transpiration**, 332, 342.  
**Transport des fardeaux**, 513, 537 et suiv.  
**Travail**, définition du —, 58 ; exté-rieur, 56, 195, 202 ; — intérieur, 56, 111, 201, 266 ; — moteur, 53, 67, 239 et suiv. ; — résistant, 53, 67 ; 239, 241, 247, 279 ; — statique, 56 ; — de frottement, 75 ; — des liaisons, 96 ; — virtuel, 96 ; — périodique, 107 ; — indique, 113, 419 ; — évaluation du —, 53, 418 ; — maximum, 253, 257 ; — principe du — maximum, 71 ; — utile, 106, 264 ; — musculaire, 236, 239, 265, 431 ; — économique, 245 ; — volontaire, 133, 248, 253, 539 ; — journalier, 257 ; — professionnel, 431, 441, 560 ; — physiologique, 112, 183, 188, 442 ; — de la marche, 514 ; — de la course, 527 ; — du saut, 530 ; — agricole, 609, 626 ; — de pho-

- nation, 644; — intellectuel, 72, 651; division du —, 375, 563.
- Travaux de force**, 294, 322, 565; — de vitesse, 294, 322, 437, 565, 629; — classification des —, 433, 565; — des bras, 433, 567; — des jambes, 437, 616; — des doigts, 437, 627.
- Trépanés**, 318.
- Trépidations** (Effets des), 192, 373, 606.
- Treuiis**, 101, 435, 567; — de carriers, 241, 270, 440, 565.
- Tricoteuses**, 631.
- Tricycle**, 35, 488.
- Trottoir dynamographique**, 409, 507.
- Tuelle spéciale**, 640.
- Tuberculose**, 148, 159, 162, 315.
- Types humains**, 322, 323, 325, 635.
- U**
- Unités** (système d' —), 115.
- Uree**, 208, 214.
- Utilisabilité** (degré d' —), 279, 672.
- V**
- Variables indépendantes**, 11, 603, 605, 635.
- Varlope**, inscrivante, 608.
- Vecteur**, 7.
- Vent**; sa vitesse, 346.
- Ventilation pulmonaire**, 261, 354; — dans les mines, 359.
- Vertèbres**, 141; — leurs articulations, 146.
- Vêtements** (utilité des), 335, 339, 345, 362, 470; — chauds, 284.
- Vibrations**, 92, 95.
- Vie**, définition de la —, 162, 187, 303; cycle de la —, 70, 72; image de la —, 110; — conditions de la —, 119.
- Vieillesse**, 70, 119, 195, 307.
- Vis**, 104.
- Viscosité**, 84, 92.
- Vitamines**, 203, 212, 233.
- Vitesse**, 2, 18; — mesure de la —, 388; — du vent, 346, 390; — des aviateurs, 356; — normale, 106; — de conduction nerveuse, 167; — de repos, 222, 259; — de croissance, 163; rôle économique de la —, 242 et suiv., 274, 641; — des réactions vitales, 222.
- Volants** (rôle des), 106; hommes —, 667.
- Vue** (rôle de la), 315, 364, 366, 589, 602.
- W**
- Waller** (méthode de), 266, 279.
- Watt**, 115, 240.
- Weir-Mitchell** (phénomène de), 462.
- X**
- Xérophites** (Plantes), 643.
- Y**
- Young** (modèle de), 85.
- Z**
- Zeine**, 202.
- Zéro absolu**, 68.
- Zinc**, rôle dans la sexualité, 188.













KOLEKCJA  
SWF UJ

A.

130



Biblioteka GI. AWF w Krakowie



1800051864