

PREMIÈRE PARTIE

MÉCANIQUE

I

PRINCIPES GÉNÉRAUX DE MÉCANIQUE

Le repos et le mouvement.

Un corps peut se trouver à l'état de repos ou à l'état de mouvement.

Considérons un corps assez petit pour pouvoir être assimilé à un point ; lorsque ce corps se déplacera dans l'espace, il décrira une courbe que l'on appelle la trajectoire du corps. Si le corps a des dimensions plus grandes, chacun de ses points aura sa trajectoire spéciale.

Ces trajectoires peuvent affecter les formes les plus diverses, depuis la ligne droite jusqu'à la courbe la plus compliquée. L'étude de ces formes comprend ce que l'on appelle la *Géométrie*.

Mais la connaissance de la trajectoire d'un point ne donne qu'une idée très incomplète de son mouvement. Pour mieux le faire comprendre, prenons un exemple. Lorsqu'un petit corps tombe en chute libre, il décrit une droite ; sommes-nous par cette connaissance complètement renseignés sur le mouvement du corps ? Il n'en est rien ; il faut encore savoir en quel point de sa trajectoire le corps se trouve aux différents moments de sa course. De même, si un train parcourt la ligne de chemin de fer de Paris-Marseille, la connaissance du trajet de la ligne ne nous suffit pas, il faut avoir l'horaire du train. — Nous voyons donc intervenir un élément nouveau, le temps, nous passons de la *Géométrie* à la *Mécanique*.

La Mécanique elle-même comprend plusieurs parties :

Il faut étudier le mouvement des corps sans s'occuper des causes de ce mouvement : cette étude constitue la *Cinématique*.

Les corps matériels sont soumis à l'action de ce que l'on appelle les forces; l'étude de ces forces et de leurs effets constitue la *Statique* lorsque les corps sont au repos, la *Dynamique* lorsqu'ils se meuvent sous l'action des forces.

Cinématique.

Mouvement uniforme. — Considérons un point se déplaçant en ligne droite. Le cas le plus simple qui puisse se présenter, est qu'à un moment quelconque de l'observation, les espaces parcourus soient égaux dans les temps égaux, c'est-à-dire qu'il faille toujours le même temps pour parcourir un mètre par exemple, quel que soit le moment où nous observons le corps. On dit alors que le mouvement est uniforme. Ainsi un train lancé sur une voie en ligne droite et parcourant 1 km. par minute est dit animé d'un mouvement uniforme.

On appelle vitesse d'un point en mouvement uniforme la longueur du chemin parcouru dans l'unité de temps. On dit qu'une balle de fusil a une vitesse de 300 m. à la seconde, un train une vitesse de 1 km. à la minute, une voiture de 12 km. à l'heure, etc.

Mouvement varié. — Mais il arrive très souvent qu'il n'en soit pas ainsi. Une voiture roulant sur une route droite peut avoir une allure très variable; de même, si nous lançons un corps de bas en haut suivant une verticale, même sans observation précise, nous remarquons qu'il met moins de temps à franchir 1 mètre au bas de sa trajectoire qu'au haut. Dans ces cas, le mouvement est dit varié.

La notion de vitesse se complique alors un peu, et pour bien comprendre ce que l'on entend par vitesse dans le mouvement varié, revenons un instant au mouvement uniforme. L'unité de temps généralement adoptée dans la mesure des vitesses est la seconde; dans ces conditions et pour un mouvement uniforme, il faudra mesurer l'espace parcouru par le corps en une seconde. Pratiquement, il est souvent impossible de faire cette mesure pendant une seconde, mais une durée d'observation quelconque

rendra
ait dur
par 10
dans ch
divisant
seconde
que l'ob
rien à la
ralemen
la traje
des pro
museul
veux.

Passé
considé
en ligne
mouven
chemin
2 m. 2
appelle
dire qu
2 m. 3
momen
nous e
100 m.
tramwa
certain
rience
à consi
sur 4
petit,
corps r
du corp
tirée d
prendre
ment d
Don
momen
observa
espace

rendra les mêmes services. Supposons, en effet, que l'observation ait duré 10 secondes, il suffira de diviser la longueur mesurée par 10 pour avoir la vitesse par seconde; d'une manière générale, dans chaque cas on aura la vitesse du mouvement uniforme en divisant la longueur du chemin parcouru par le nombre de secondes exigées pour ce parcours. Bien entendu, il arrive parfois que l'observation dure moins d'une seconde, mais cela ne change rien à la règle que nous venons de poser. Ce cas se présente généralement pour les grandes vitesses lorsqu'une petite étendue de la trajectoire est seule accessible, ainsi lorsqu'on mesure la vitesse des projectiles à la sortie de la bouche à feu, ou la vitesse de l'onde musculaire, ou encore la vitesse de propagation de l'influx nerveux.

Passons maintenant au mouvement varié. Pour fixer les idées, considérons un tramway parcourant une voie idéale de 10 km. en ligne droite et employant une heure à faire ce parcours. Si le mouvement était uniforme, nous aurions sa vitesse en divisant le chemin parcouru par le temps; on obtiendrait ainsi une vitesse de 2 m. 20 environ à la seconde. Ce chiffre exprime ce que l'on appelle la vitesse moyenne du corps, mais cela ne veut nullement dire qu'en un point quelconque de la voie, le tramway parcourait 2 m. 80 par seconde: par moment il franchissait plus, par moment moins; on peut même supposer des arrêts. Mais plaçons-nous en un point du parcours, mesurons une longueur de 100 m., par exemple, et comptons le temps nécessaire pour que le tramway la franchisse, nous déduirons de cette observation une certaine vitesse moyenne pour ces 100 m. Faisons la même expérience avec des distances de plus en plus petites, nous arriverons à considérer la vitesse moyenne au point où nous nous trouvons, sur 1 m., 1 dm., 1 cm., etc. Or si cet espace parcouru est assez petit, nous pouvons admettre qu'en le traversant la vitesse du corps n'a pas varié, et nous disons que, par définition, la vitesse du corps à l'endroit où nous nous trouvons est la vitesse moyenne tirée d'une observation de très courte durée. C'est la vitesse que prendrait le corps si, à partir du point d'observation, le mouvement devenait uniforme.

Donc, pratiquement, si l'on veut connaître la vitesse à un moment donné d'un corps en mouvement varié, il faut faire une observation sur un parcours assez restreint pour que dans cet espace on puisse considérer le mouvement comme uniforme.

Ainsi, quand un projectile sort du canon, il prend une certaine vitesse qui va en diminuant; pour mesurer la vitesse initiale, c'est-à-dire la vitesse au commencement de la trajectoire, on fait cette mesure sur un parcours d'un mètre environ pendant lequel il n'y a pas encore eu de diminution.

Mouvement uniformément varié. — Parmi les divers mouvements variés, il en est un particulièrement intéressant, c'est celui pour lequel cette variation se produit régulièrement; dans des temps égaux, la vitesse augmente ou diminue de quantités égales. L'exemple classique est celui du mouvement d'un corps en chute libre. L'expérience montre que si on observe un pareil corps au bout de 1 seconde, 2 secondes, 3 secondes, etc., sa vitesse augmente d'une même quantité chaque fois qu'une nouvelle seconde s'écoule. Ainsi, en supposant négligeable la résistance de l'air et mesurant la vitesse d'un corps en chute libre au bout de la première seconde de chute, on trouve qu'elle est de 9 m. 808 par seconde; si, maintenant, à un moment quelconque, nous mesurons cette vitesse, puis encore une seconde plus tard, nous pourrions constater que pendant ce laps de temps la vitesse du corps a augmenté de 9 m. 808 par seconde. Le mouvement, dont la vitesse va ainsi en augmentant régulièrement, est dit uniformément accéléré.

Mais il pourra arriver qu'un corps soumis à l'influence de la pesanteur soit lancé verticalement de bas en haut; sa vitesse, au lieu d'aller en croissant, diminuera sans cesse jusqu'à venir à zéro. A partir de ce moment, le corps cessera de s'élever; nous pourrions trouver par l'expérience que, dans ce cas, la variation de la vitesse est encore constante. Chaque fois qu'une seconde s'écoule, la vitesse diminue de 9 m. 808; nous avons affaire à un mouvement uniformément retardé.

On représente conventionnellement la vitesse d'un point sur sa trajectoire par une flèche dont l'orientation indique la direction de la vitesse. Il en résulte que cette flèche doit être tangente à la trajectoire du corps. De plus, on donne à la flèche une longueur proportionnelle à la grandeur de la vitesse. Sur un dessin, une certaine longueur de flèche figurant une vitesse de 1 m. par seconde, une flèche deux fois, trois fois, dix fois plus longue représentera une vitesse de 2, 3, 10 m. par seconde.

Composition des mouvements. — Le déplacement d'un corps,

par m
parfois

Sup
ber un
(fig. 3
venu
démon
D'une
duisem
l'un d
par *ab*
en con
sont le
la dia
Cet

les vi
corps
corps

Inv
suivan
déplac
ments
même
l'élog
seron

Ex
suivan
mène
comp

par rapport au milieu immobile dans lequel il est placé, peut parfois ne pas apparaître immédiatement dans son exactitude.

Supposons que l'on se trouve en chemin de fer : on laisse tomber un corps ; par l'effet de la pesanteur il se déplacerait de A en B (fig. 3) ; mais, pendant cette chute, le point A est venu en C par suite de la vitesse du train : on démontre qu'en ce moment le corps est en D. D'une façon générale si deux mouvements produisent simultanément leurs effets sur un corps, l'un de ces mouvements pouvant être représenté par *ab* (fig. 4), l'autre par *ac*, on a l'effet résultant en complétant le parallélogramme, dont *ac* et *ab* sont les côtés ; le corps sera finalement en *d* sur la diagonale à l'extrémité opposée de son point de départ.

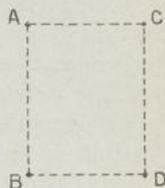


Fig. 3.

Cette règle de composition des mouvements se retrouve pour

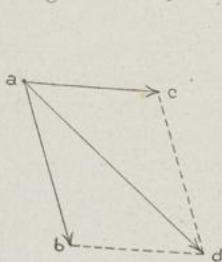


Fig. 4.

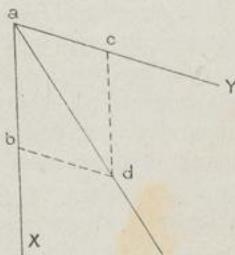


Fig. 5.

les vitesses. Si à un moment, une cause quelconque donne à un corps *a* une vitesse *ac* (fig. 4), une autre cause la vitesse *ab*, le corps aura finalement la vitesse résultante *ad*.

Inversement on peut décomposer un mouvement ou une vitesse suivant deux directions, c'est-à-dire sachant que le corps a un déplacement ou une vitesse *ad*, trouver deux mouvements ou deux vitesses dont la combinaison produit le même effet résultant, il suffit de construire un parallélogramme dont *ad* est la diagonale, les deux côtés seront les composantes cherchées.

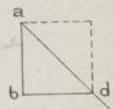


Fig. 6.

Exemples. On donne *ad* (fig. 5) et deux droites *ax*, *ay*, suivant lesquelles on veut que les composantes soient dirigées, on mène par *d* les parallèles *db* et *dc* à *ay* et *ax*, *ab* et *ac* seront les composantes cherchées.

Ou bien on donne ad (fig. 6) et une des composantes ab . On joint db ; db est l'autre côté du parallélogramme et par suite l'autre composante.

Accélération. — Reprenons le cas d'un mouvement uniformément varié, par exemple celui du corps qui tombe en chute libre. Nous avons vu qu'à chaque seconde correspond une même augmentation de vitesse de 9 m. 808. Cette quantité, dont la vitesse s'accroît dans l'unité de temps, est ce que l'on nomme l'accélération du mouvement.

L'accélération peut être plus ou moins grande, et la vitesse ira, par suite, en croissant plus ou moins rapidement.

Il peut arriver que dans un mouvement varié la vitesse aille en diminuant; c'est ce qui se produit, par exemple, lorsqu'un corps pesant est lancé de bas en haut. Alors l'accélération agit en sens inverse de la direction du déplacement.

Dans l'un et l'autre cas, l'accélération dirigée dans le sens du mouvement ou en sens inverse, mais étant parallèle à la direction de ce mouvement, n'a d'autre effet que d'altérer la vitesse du corps en grandeur sans en modifier la direction.

On conçoit aisément que l'accélération d'un mouvement puisse ne pas être constante, mais qu'elle varie à chaque instant comme on a vu varier la vitesse.

Il se peut aussi, cela est même fréquent, que l'accélération ne se borne pas à changer la valeur de la vitesse, mais qu'elle en modifie la direction, cela revient à dire qu'à la vitesse du corps à un moment donné, s'ajoute ou se retranche une vitesse de direction différente.

Composition d'accélération. — Les accélérations se représentent comme les vitesses, en grandeur et en direction, par des flèches, et d'après la manière dont nous avons établi l'existence de ces accélérations, on peut comprendre que leur règle de composition soit la même que la règle de composition des vitesses.

La force.

Principe de l'inertie. — Un corps matériel ne peut modifier son état de repos ou de mouvement, sans l'intervention d'une cause extérieure.

La première partie de ce principe se conçoit aisément : un corps au repos ne se met pas en mouvement spontanément, il faut qu'une cause extérieure agissant sur lui le déplace. Ainsi un poids posé sur le sol y restera indéfiniment immobile, s'il reste abandonné à lui-même.

La deuxième partie demande quelques explications. Lorsqu'un corps est en mouvement, à un instant donné il possède une certaine vitesse. S'il est absolument libre et soustrait à toute influence extérieure, l'observation montre que cette vitesse ne se modifie en rien, ni en grandeur ni en direction; par conséquent, ce corps conservera une vitesse constante, il parcourra une ligne droite d'un mouvement uniforme. Il n'aura aucune accélération. Pour modifier cet état de mouvement uniforme du corps, c'est-à-dire, pour modifier sa vitesse, il faut lui communiquer une certaine accélération, ainsi que nous l'avons vu plus haut; suivant les cas, et, selon cette accélération il ne se produira qu'un simple changement dans la grandeur de la vitesse, ou simultanément un changement dans la grandeur de cette vitesse et dans sa direction. Dans ce dernier cas la trajectoire du corps ne sera plus une ligne droite. Cette accélération que nous voyons intervenir ne se crée pas de rien, elle a une cause; cette cause nous est inconnue dans son essence même; on lui donne le nom de force. Ainsi donc, lorsque la force agit sur un corps libre elle lui communique une certaine accélération, ce qui met le corps en mouvement s'il était primitivement au repos, et modifie sa trajectoire et sa vitesse, s'il se déplaçait déjà.

Une pierre lancée dans l'espace se déplacerait en ligne droite d'un mouvement uniforme si la force d'attraction de la terre ne lui communiquait une certaine accélération, et sous cette influence la pierre décrit une courbe.

Nous venons de voir comment la notion de force s'introduit en mécanique : la force est la cause de l'accélération. Mais nous ne sommes nullement renseignés sur la nature de la force; jamais il ne nous a été donné de la voir; nous ne la connaissons que par ses effets. De même que nous n'avons jamais vu de courant électrique et que nous ne connaissons son existence que par les effets qu'il produit : déviation de l'aiguille aimantée, décompositions chimiques, etc., de même nous ne connaissons la force que par l'accélération qu'elle produit.

Cependant pour pouvoir étudier les effets des forces, il faut

que nous puissions les mesurer comme nous mesurons les courants.

Lorsque nous étudions les décompositions chimiques produites par le courant électrique, nous prenons le système de mesure le plus simple et nous disons qu'un courant est deux fois, trois fois, etc., dix fois plus intense qu'un autre courant pris comme unité, lorsque dans les mêmes circonstances ce premier courant produit une décomposition deux fois, trois fois, etc., dix fois plus grande que le deuxième.

Pour évaluer les forces que nous ne connaissons que par les accélérations, nous opérerons de même; lorsque nous verrons un même corps prendre une accélération deux fois, trois fois, etc., dix fois plus grande, nous dirons que la force qui agit sur lui est deux fois, trois fois, etc., dix fois plus grande.

Mais si un même corps soumis à une même force prend toujours la même accélération, et si ce même corps soumis à des forces différentes prend une accélération proportionnelle à la force, comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, il n'en est plus de même quand on opère sur des corps différents; nous allons au contraire voir intervenir un nouvel élément des plus importants, la masse.

Admettons que nous puissions librement disposer d'une force constante et faisons-la exercer son action sur une série de corps; il pourra arriver que certains de ces corps prennent la même accélération: nous dirons qu'ils ont la même masse; ceux qui prendront des accélérations différentes auront des masses différentes. Pour simplifier, supposons que tous ces corps soient de même nature, qu'ils soient tous en cuivre par exemple; nous constaterons que ceux qui prennent la même accélération ont des volumes égaux, que les plus petits prennent l'accélération la plus grande, les plus grands l'accélération la plus petite. En un mot, par cette expérience nous pouvons prouver que, soumis à une même force, divers corps prennent une accélération en raison inverse de leur masse.

Pour donner à tous les corps la même accélération, il faut leur appliquer des forces proportionnelles à leur masse. Ainsi, tous les corps soumis à l'attraction terrestre, à une même distance du centre de la terre, prennent la même accélération parce que la force exercée par l'attraction de la terre est proportionnelle à la masse des corps attirés.

Donc
à l'acce
masse d
d'ailleu

Unité
faut ch
que nou

Comme
que les
système
on a pr
Cette u
abrévia
terrestre

Souvent
alors la
tillée, c

est par
Sur
grande

elles se
Dans
un cor

tent de
quents

point.
La f

à trave
sons,
deux s

(fig. 7)
procéd

A une
flèche

et B,
était a
mise i
force
sur le

Donc, on admet par convention que la force est proportionnelle à l'accélération et l'expérience démontre qu'elle l'est aussi à la masse du corps qu'elle met en mouvement, toutes choses égales d'ailleurs.

Unités de force et de masse. — Avant d'aller plus loin, il faut choisir des unités nous permettant de mesurer les quantités que nous voulons étudier.

Comme toujours, ces unités sont des grandeurs de même espèce que les grandeurs à mesurer. En France, elles sont reliées au système métrique. Pour des raisons qu'il est inutile d'exposer ici, on a pris comme unité de masse la masse de 1 cm³ d'eau distillée. Cette unité s'appelle le gramme. On appelle généralement par abréviation une force de 1 g. la force exercée par l'attraction terrestre sur le gramme.

Souvent on emploie des unités mille fois plus grandes, on a alors la masse de 1 kilogramme correspondant au dm³ d'eau distillée, et la force que l'attraction terrestre exerce sur cette unité est par abréviation appelée une force de 1 kilogramme.

Sur les figures, les forces se représentent par des flèches en grandeur et en direction, comme les accélérations, auxquelles elles sont proportionnelles.

Dans un grand nombre de cas, les forces auxquelles est soumis un corps ne proviennent pas d'une action à distance, mais résultent du contact d'autres corps. Les exemples en sont trop fréquents et trop connus pour qu'il soit nécessaire d'insister sur ce point.

La force se transmet intégralement en grandeur et en direction à travers les corps rigides. Supposons, par exemple, que nous ayons deux sphères A et B, au contact (fig. 7). En faisant agir par un procédé quelconque sur la sphère A une force représentée par la

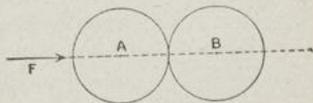


Fig. 7.

flèche F, dont le prolongement passe par le point de contact A et B, nous obtiendrons sur B le même effet que si la force était appliquée directement à ce point de contact, elle s'est transmise intégralement à travers A. Il est d'ailleurs indifférent que la force F soit appliquée en un point quelconque du corps A situé sur le prolongement de la flèche F représenté en ligne pointillée.

Ce fait est général. Lorsqu'une force F , agit sur un corps rigide A , elle produit toujours le même effet, quel que soit le point de

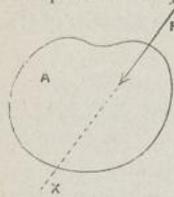


Fig. 8.

direction FX (fig. 8) auquel cette force est appliquée, elle se transmet toujours intégralement en ligne droite à travers tout le corps. Il est bien entendu que le corps doit être considéré comme absolument rigide et résistant; nous verrons plus loin ce qui se passe lorsqu'il peut se déformer sous l'action des forces qui le sollicitent, que ce soit un

liquide, un corps élastique ou un corps mou.

Mais revenons à la figure précédente : la force, avons-nous dit, s'exerce sur le corps B par l'intermédiaire de A ; ici encore nous rencontrons un principe très important.

Principes de l'action et de la réaction. — A toute action correspond une réaction égale et de sens contraire.

C'est-à-dire, dans le cas particulier qui nous occupe, si le corps A exerce sur B une force F , inversement le corps B exerce sur A au point de contact une force, appelée la réaction, précisément égale à F et dirigée en sens contraire. Si nous pressons avec le doigt contre le mur avec une force de 1 kg. le mur à son tour presse contre notre doigt avec cette même force; si, par exemple, nous avons mis entre le mur et le doigt une feuille de papier, cette feuille de papier supporte sur chacune de ses faces une pression de 1 kg., d'un côté l'action du doigt et de l'autre la réaction du mur.

Ceci est vrai que les corps soient au repos ou en mouvement.

Action simultanée de plusieurs forces. — Il arrive souvent que plusieurs forces agissent simultanément sur un même corps. Prenons par exemple le cas le plus simple, celui où un corps A est soumis à l'action de deux forces F et F' qui se trouvent dans le prolongement l'une de l'autre (fig. 9). Nous savons que ces deux forces peuvent être considérées comme appliquées en un même point du corps situé sur la ligne XY , leur action s'ajoute et tout se passe comme si le corps subissait l'action d'une seule force R dirigée suivant XY et égale à la somme $F + F'$.

F et F' se nomment les deux composantes, R est la résultante.

Ainsi sur ce pr subit de l

De mè chef étar au mêm transmis somme d chefs du

Il arr agissant vant la r où les d des dro démon à la son parallè un poin

Natur forces peut, en résultan de tout

Elle plus lo remplac

Enfin étant p le mêm

résultan gées d cette s inverse

Il y représe forces l'autre demme subira lement

Ainsi, si sur une table nous plaçons un poids de 2 kg., puis sur ce premier poids un autre de 3 kg., la table subit de haut en bas une pression de 5 kg.

De même, le long chef du biceps et le court chef étant sensiblement parallèles et s'attachant au même tendon inférieur, l'action résultante transmise par ce tendon au radius est égale à la somme des tractions développées par chacun des chefs du biceps.

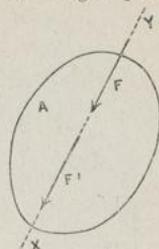


Fig. 9.

Il arrive souvent que des forces parallèles agissant sur un corps ne soient pas dirigées suivant la même droite; tel est, par exemple, le cas de la figure 10, où les deux forces A et B sont parallèles mais dirigées suivant des droites différentes. Dans ce cas, on démontre que la résultante est encore égale à la somme des deux composantes, elle est parallèle à ces deux composantes, et passe par un point O tel que $Oa \times aA = Ob \times bB$.

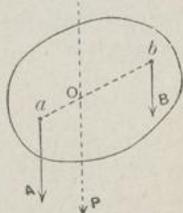


Fig. 10.

Naturellement, lorsque le nombre des forces est égal ou supérieur à deux, on peut, en les associant, les réduire à une seule résultante. Cette résultante est égale à la somme de toutes les composantes et leur est parallèle.

Elle est appliquée en un point G (fig. 11) que nous étudierons plus loin. Tout se passe comme si l'ensemble des forces était remplacé par une seule résultante appliquée en G.

Enfin, dans certains cas, les forces, tout en étant parallèles, ne sont pas toutes dirigées dans le même sens; on démontre que, pour avoir la résultante, il faut ajouter toutes les forces dirigées dans le sens, direct et retrancher de cette somme toutes les forces dirigées en sens inverse.

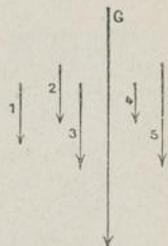


Fig. 11.

Il y a un cas particulièrement important, représenté sur la figure 12, c'est celui où les forces se réduisent à deux, inverses l'une de l'autre et égales. Quand on cherche la résultante, on trouve évidemment qu'elle est nulle. Cela veut-il dire que le corps ne subira aucun déplacement sous l'action des forces A et B? Nullement, mais le point G, auquel est appliquée la résultante de A

et de B, reste immobile lors du mouvement du corps; c'est-à-dire que, sous l'influence des forces A et B, le corps tournera autour du point G, fixe dans l'espace.

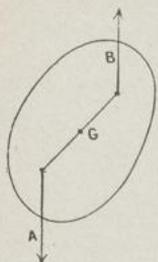


Fig. 12.

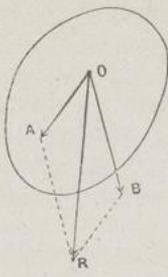


Fig. 13.

Une association de deux forces telles que A et B se nomme *un couple*. Lorsque deux forces ne sont pas parallèles, mais sont appliquées en un même point O d'un corps (fig. 13), leur règle de composition est la même que celle des accélérations, c'est-à-dire que leur résultante R est la diagonale du parallélogramme dont elles forment les deux côtés.

Quand les deux forces ne sont pas appliquées au même point

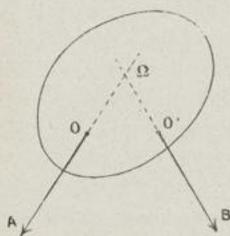


Fig. 14.

mais que leurs prolongements se rencontrent en Ω (fig. 14), chacune de ces deux forces peut, comme nous le savons, se déplacer dans sa propre direction. En particulier nous pouvons les supposer transportées en Ω et nous serons ramenés au cas précédent.

Mais souvent deux ou plusieurs forces appliquées à un même corps ne se rencontrent pas : ce problème devient alors trop

compliqué pour être traité ici. Tout ce que nous pouvons dire, c'est qu'un nombre quelconque de forces agissant sur un corps peut toujours être réduit à une force et un couple.

Centre de gravité.

Les diverses particules composant un corps matériel subissent de la part de la terre une attraction se traduisant par des forces agissant sur ces particules. Toutes ces forces, parallèles entre elles, ont une résultante R dont la position dépend naturellement de la forme du corps, mais dont la grandeur est égale à la somme de toutes les composantes élémentaires.

Quant à l'indiquer ne change toutes les positions du corps et

Dans nous p corps se de grav

Il p sur un libre ; reste o vemen Si l aisé de compo nulle.

Deu applic 1^{er} repose Supp

Quand nous plaçons le corps dans diverses positions, comme l'indiquent les figures 15, 16 et 17, la grandeur de la résultante ne change évidemment pas, puisqu'elle est toujours la somme de toutes les forces élémentaires indépendantes de la position du corps. Mais l'orientation de la résultante par rapport au corps variera et dépendra de la position du corps. Or, dans toutes ces positions la résultante passera par un certain point G fixe dans le corps et que l'on appelle son centre de gravité.

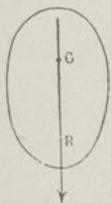


Fig. 15.

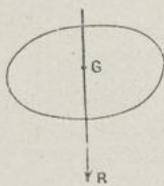


Fig. 16.

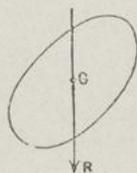


Fig. 17.

Dans toutes les questions de Mécanique qui se présenteront, nous pourrons toujours considérer l'action de la terre sur un corps solide comme se réduisant au poids total appliqué au centre de gravité.

Statique.

Il peut arriver que les effets de toutes les forces agissant sur un corps s'annulent; on dit alors que ce corps est en équilibre; il reste immobile s'il est au repos, ou bien, sa vitesse reste constante en grandeur et en direction, s'il est en mouvement.

Si l'on connaît toutes les forces agissant sur un corps, il est aisé de chercher si les conditions d'équilibre sont réalisées, il faut composer toutes ces forces entre elles et voir si la résultante est nulle.

Deux cas sont principalement intéressants par leurs nombreuses applications pratiques.

1^{er} CAS. — Le corps, soumis à la pesanteur et à d'autres forces, repose sur une surface d'appui, un plan horizontal par exemple. Supposons le frottement de la surface suffisant pour éviter le

glissement du corps. Nous avons une résultante pour les forces agissantes. Relions tous les points d'appui entre eux de façon à former un polygone convexe, ne laissant aucun point d'appui

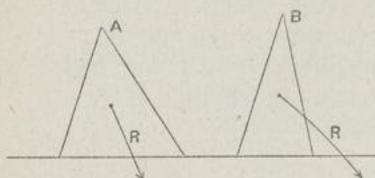


Fig. 18.

extérieur à lui, on démontre qu'il y aura équilibre si la résultante des forces agissantes passe en dedans (fig. 18, A) de ce polygone, dit *polygone de sustentation*. Sinon le corps basculera (fig. 18, B) autour d'un des

côtés du polygone, et se renversera.

2^e CAS. — Le corps peut tourner autour d'un axe. Supposons que cet axe se projette suivant le point o du plan du papier qui lui est perpendiculaire. Projetons aussi chaque force agissante sur ce plan comme nous l'avons fait pour F , enfin abaissons la perpendiculaire of sur F ; $of \times F$ est ce que l'on nomme le *moment* de la force F par rapport à o . On conçoit que certains moments tendent à faire tourner le corps dans un sens que nous appellerons *direct*, les autres en sens inverse. On démontre qu'il y a équilibre quand la somme de tous les moments directs est égale à la somme de tous les moments inverses.

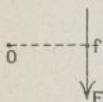


Fig. 19.

Il peut enfin arriver qu'au lieu de tourner autour d'un axe le corps tourne autour d'un point fixe. Il y aura équilibre quand l'équilibre existera pour un axe quelconque passant par le point fixe. Ainsi on prendra un axe quelconque passant par le point fixe et on cherchera s'il y a équilibre. On démontre que si cette même condition est établie pour trois axes n'étant pas tous trois dans un même plan le corps est en équilibre autour du point o .

Dynamique.

La Dynamique est certainement la partie de la Mécanique dans laquelle les gens peu habitués à cette science commettent le plus d'erreurs, en cherchant à prévoir ce qui se passera pour un corps en mouvement d'après les connaissances acquises sur ce corps au repos. Que de fois on entend demander quelle peut être la force

produite
vitesse
faire voir
tions, où

Prenons
pendu à
le fil por
dra ce p
donnant
pour dé
connu;
l'explica
poids de
la même

Voici
Prenez
tiques,
un poin
Prenez
en bas
il arrive
ment le
la main
que la t

Mais
si le po
inférieu

Du m
un petit
et à le
pour le
au pren
contrad
statique
que les

En Sta
de la n
voir pr
faute d
sent so

produite par le choc d'un corps de poids donné, animé d'une vitesse connue ou tombant d'une hauteur déterminée. Nous allons faire voir combien l'on peut se tromper dans ces sortes de questions, où les problèmes posés n'ont souvent aucun sens.

Prenons une expérience de tous les jours : Un poids est suspendu à un fil ; si ce poids est abandonné à lui-même doucement, le fil pourra, s'il est assez résistant, ne pas se rompre ; il soutiendra ce poids dans l'espace. Mais il arrivera souvent qu'en abandonnant brusquement le poids après l'avoir soulevé légèrement pour détendre le fil, il y aura rupture. Ce fait est bien connu ; cependant, au premier abord, on n'en voit pas l'explication ; c'est toujours la même force qui agit, le poids du corps ; le fil devrait se comporter toujours de la même façon.

Voici une autre expérience encore plus frappante. Prenez une sphère pesante, attachez-y deux fils identiques, un supérieur qui permettra de la suspendre à un point fixe, l'autre inférieur, qui pendra librement. Prenez le bout inférieur à la main et exercez de haut en bas une traction légère et graduellement croissante ; il arrivera un moment où il y aura rupture. C'est évidemment le lien supérieur qui cassera, car il supporte la traction de la main plus le poids de la sphère, le bout inférieur ne supportant que la traction.

Mais au lieu d'agir avec douceur, donnez une secousse brusque ; si le poids de la sphère est convenablement choisi, ce sera le bout inférieur qui se rompra.

Du même ordre est encore l'expérience consistant à supporter un petit bâton placé horizontalement sur des supports très fragiles et à le briser d'un coup bien appliqué au milieu, sans accident pour les supports. Une foule de phénomènes analogues, étranges au premier abord, se rencontrent tous les jours, paraissant en contradiction absolue avec ce que nous avons étudié dans la statique. Cela tient à ce qu'un nouvel élément intervient aussitôt que les corps ne sont plus au repos ; c'est l'inertie de la matière. En Statique, nous n'avons jamais parlé d'inertie ; cette propriété de la matière n'y joue aucun rôle ; nous allons, au contraire, la voir prendre place au premier rang dans la Dynamique, et c'est faute d'en tenir compte que certains résultats d'expérience paraissent souvent si surprenants.



Fig. 20.

Nous ne saurions assez mettre en garde les débutants contre cette source d'erreurs, ni assez leur répéter qu'un résultat acquis par l'étude d'un corps au repos perd toute sa valeur aussitôt que ce corps se met en mouvement.

Travail mécanique.

La notion de travail mécanique, non seulement domine toute la Dynamique, mais aussi a complètement bouleversé la science contemporaine, depuis qu'on a découvert ses diverses transformations. Malgré son importance, quelques expérimentateurs semblent ne pas en avoir bien saisi les éléments; aussi est-il indispensable de bien se pénétrer des conditions dans lesquelles il se produit.

Supposons qu'une force agisse sur un corps, et que sous l'influence de cette force le corps se déplace, on dit qu'il y a dépense de travail mécanique. Pour qu'il y ait production de travail mécanique, deux éléments sont indispensables :

- 1° Une force agissant sur un corps matériel;
- 2° Un déplacement de ce corps matériel sous l'influence de la force.

Si une de ces conditions venait à disparaître, il n'y aurait plus de travail. C'est surtout la seconde qui semble avoir parfois été omise, et cependant Poncelet a beaucoup insisté sur ce point et a fait remarquer qu'une pression, quelque énergique qu'elle soit, exercée contre un mur fixe, ne donne lieu à aucune production de travail, pas plus qu'un corps pesant placé sur une table.

Évaluation du travail. — Considérons un corps se déplaçant sous l'influence d'une force, les deux conditions de production de travail sont réalisées; comment évaluerons-nous le travail dépensé? Il est évident que ce travail croît proportionnellement à la force, c'est-à-dire que, si la force devient deux fois, trois fois, etc., dix fois plus grande, le travail dans de mêmes conditions de déplacement du corps, devient deux fois, trois fois, etc., dix fois plus grand, puisqu'on pourrait considérer chaque fraction de force comme agissant pour son propre compte, puis faire le total du travail obtenu.

Quant au chemin parcouru, il intervient de la même façon, car la force a le même effet pendant le premier mètre, par exemple,

que pendant
travail

Par ce
et au ch
l'aide d
produit d

En Fr
en mètre
une long
Cette un
Suppo
cours de

Dans
parcour
force, m
la force
corps. I
chaland
et, par
par le
compar
à la rou
pour ve
du para

Dans
faire u
à la dir
exempl
au che
connue
perpen
il est é
à reste
consid
min /

que pendant tous les mètres suivants, et produit toujours le même travail pour chaque mètre parcouru.

Par conséquent, le travail croît proportionnellement à la force et au chemin parcouru; si on a mesuré la force et le chemin à l'aide d'unités convenables, le travail s'obtient en faisant le produit des nombres trouvés.

En France, les forces s'évaluent en kilogrammes, les longueurs en mètres; si on a une force de 1 kg. produisant du travail sur une longueur de 1 mètre, ce travail produit doit être égal à l'unité. Cette unité s'appelle le kilogrammètre.

Supposons qu'une force de 25 kg. s'exerce pendant un parcours de 4 mètres; le travail produit sera

$$T = 25 \times 4 = 100 \text{ kilogrammètres.}$$

Dans ce qui précède, la force agit dans la direction du chemin parcouru, le corps est supposé libre sous l'influence de cette force, mais il arrive très souvent qu'il n'en soit plus ainsi et que la force soit oblique par rapport à la direction de propagation du corps. Les exemples en sont fréquents: il suffit de regarder un chaland halé sur un canal pour voir que la direction de la corde et, par suite, de la force, est oblique par rapport au chemin suivi par le chaland, ou bien de comparer la direction du vent à la route suivie par un bateau pour voir combien on est loin du parallélisme.

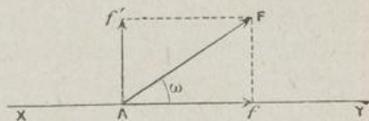


Fig. 21.

Dans ces conditions, il faut faire une décomposition de forces en deux autres, l'une parallèle à la direction du chemin parcouru, la seconde perpendiculaire. Par exemple, sur la figure, la force F agit sur le corps A obliquement au chemin parcouru XY . On la décompose suivant la méthode connue en f , agissant dans la direction de propagation, et f' , perpendiculaire à cette direction; f' ne produit aucun travail, car il est évident que si cette force agissait seule, le corps A , astreint à rester sur XY , ne bougerait pas. C'est donc f seul qu'il faut considérer, et quand le corps A a parcouru une longueur de chemin l sur XY , le travail dépensé pour cela aura été

$$T = l \times f.$$

Transformation du travail en force vive.

Nous venons de voir un corps libre se mettre en mouvement sous l'influence d'une force, nous avons dit que cette force donnait lieu à une production de travail, mais il y a un autre point très important qu'il faut considérer maintenant. Le corps était au repos; après la production de travail, il est animé d'une vitesse plus ou moins grande suivant son poids, suivant la quantité de travail fourni. Comment ces divers éléments sont-ils liés entre eux? Prenons un exemple idéal qu'il n'est pas possible de réaliser rigoureusement, mais aux défauts duquel on peut suppléer par l'imagination.

Soit un wagon idéalement mobile sur des rails, c'est-à-dire ne subissant aucune résistance passive de la part de l'air ou des frottements de ses divers organes. Ce wagon est au repos et nous allons chercher à le mettre en mouvement en le poussant devant nous. Pour cela, il faudra exercer un certain effort, et, le wagon avançant, nous dépenserons du travail pendant que sa vitesse ira en augmentant. Ce wagon ayant acquis de la vitesse, la conservera si nous cessons d'agir sur lui; il possède ce que l'on appelle de la *force vive*.

L'expérience même la plus grossière permet de constater que pour amener un wagon à une certaine vitesse, il faudra dépenser un travail d'autant plus considérable que le wagon est plus lourd, c'est-à-dire que sa masse est plus grande.

Ce n'est qu'une étude semée de grosses difficultés, qui a permis aux mécaniciens d'établir la relation exacte existant entre le travail dépensé, la masse du corps mis en mouvement et la vitesse à la fin de l'opération. Cette relation est exprimée par la formule :

$$T = \frac{1}{2}mv^2.$$

Le deuxième terme de cette égalité représente ce que nous avons appelé la force vive : c'est la moitié de la masse du corps multipliée par le carré de sa vitesse. C'est sous cette forme de force vive que le travail dépensé est pour ainsi dire emmagasiné dans le corps en mouvement, et il y restera tant qu'une cause extérieure ne viendra pas, suivant le principe de Newton, modifier cet état de mouvement.

Il per
on dési
la force
résultat,

En ex
vive, on
par suit
énormes
grande
ment de
pourquo
Considé
lorsque
osciller,
nant de
tandis q
tant de l
considér
nécessit
plus gra
conçoit
à-dire un
devront

T
Un w
vive un
mouvem
rêter in
rons plu
quer un
provienc
lui. Le
force qu

Il peut arriver qu'un corps ayant déjà une certaine vitesse v , on désire l'augmenter et la pousser jusqu'à une autre valeur v' ; la force vive passera alors de $\frac{1}{2}mv^2$ à $\frac{1}{2}mv'^2$ et pour arriver à ce résultat, on aura dépensé une quantité de travail donnée par :

$$T = \frac{1}{2}mv'^2 - \frac{1}{2}mv^2.$$

En examinant avec soin la formule liant le travail à la force vive, on conçoit pourquoi, même en l'absence de toute résistance, par suite du seul fait de l'inertie, il faut exercer des efforts énormes pour animer de quelque vitesse les corps ayant une grande masse; pourquoi, par exemple, on écarte plus difficilement de la verticale un pendule lourd qu'un pendule léger, et pourquoi ces déplacements ne peuvent se produire brusquement. Considérons en effet un tel pendule dans sa position d'équilibre; lorsque nous chercherons à le déplacer légèrement pour le faire osciller, nous n'aurons pas à vaincre de grande résistance provenant de l'attraction terrestre, qui s'exerce suivant la verticale, tandis que notre poussée sera horizontale. Le pendule en s'écartant de la verticale prendra une certaine vitesse; si sa masse est considérable, il aura une grande force vive dont l'acquisition aura nécessité une dépense de travail, et par suite une force, d'autant plus grande que la masse du pendule est plus importante. On conçoit aussi que plus on désirera un déplacement rapide, c'est-à-dire une grande vitesse, plus le travail dépensé et l'effort exercé devront être considérables.

Transformation de force vive en travail.

Un wagon, lancé sur une voie horizontale, conservera sa force vive une fois que la force extérieure, qui a servi à le mettre en mouvement, aura cessé d'agir. Il sera inutile de chercher à l'arrêter instantanément, il en résulterait des chocs dont nous parlerons plus loin. Pour le faire revenir au repos, il faudra lui appliquer une force en sens inverse de son mouvement; cette force proviendra d'un obstacle placé devant le wagon et entraîné par lui. Le wagon exercera contre cet obstacle exactement la même force que celle qu'il reçoit lui-même de sa part, d'après le principe

d'égalité de l'action et de la réaction ; par conséquent, le wagon communique du travail à l'obstacle, et fait une dépense empruntée à sa force vive. Il s'arrêtera lorsqu'il aura usé toute cette force vive, qui se sera transformée en travail mécanique, inversement à ce que nous avons vu précédemment.

Si la force ainsi opposée au wagon est petite, il faudra pour l'arrêter un parcours très long ; si elle est grande, ce parcours sera petit ; car, la quantité de travail à produire étant la même, il faut que le produit de la force exercée par le wagon contre l'obstacle, multipliée par le déplacement de cet obstacle ait la même valeur. Si l'une de ces quantités diminue, par compensation l'autre doit augmenter dans la même proportion. On conçoit, dès lors, qu'aucune force, quelque grande qu'elle soit, ne pourra produire un arrêt instantané ; si le wagon heurte un obstacle fixe, il y aura un choc, et au point de contact une déformation des deux corps permettra au wagon, malgré la force énorme qui s'opposera à son mouvement, de faire un léger parcours, suffisant pour dépenser sa force vive sous forme de travail mécanique.

Dans tous les cas, en observant avec soin ce qui se passe, nous pourrons voir, lors du mouvement que prend un corps, du travail s'emmagasiner sous forme de force vive, puis, pendant le retour au repos, la transformation inverse se produire.

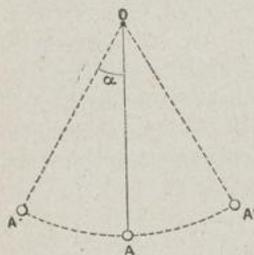


Fig. 22.

Un des exemples les plus frappants de cette transformation se rencontre dans l'oscillation d'un pendule autour de la verticale au point de suspension. Prenons le pendule A suspendu au point O et écartons-le en A' d'un angle α , puis abandonnons-le à lui-même en le laissant osciller. Sous l'influence de la pesanteur, il descend de A' en A ; pendant tout ce temps il y a production de travail mécanique ; aussi voyons-nous la vitesse du pendule aller en augmentant ; elle est nulle au départ A', elle atteint sa valeur maxima en A. Le travail a produit de la force vive. Mais nous savons aussi qu'arrivé en A, position d'équilibre où nulle force ne tend à déplacer le pendule, ce pendule ne s'arrêtera pas ; il continue son chemin avec sa vitesse acquise et remonte en A'' à une hauteur égale à celle de A'. Pendant le mouvement de A en A'', l'attraction terrestre tend à s'opposer au déplacement du corps,

sa vitesse
dant ce
dans ces
formation
proche de
éloigne.

Il est r
tant un p
le poids p
quement

Prenon
un corps
gera sou
moment,
rupture.

puis aba
qu'il arr
B en B',
traction

emmag
vera en
oscillant

tera pas
un poin
formation
que le f
que lor
lui-même

Pour
est-ce le
secouss

sphère t
temps, l
mouvem

plus fail
la secou
suffisant
sphère r
produit
donc pa

sa vitesse va en diminuant, sa force vive s'annule peu à peu. Pendant ce temps, le pendule a dépensé sa force vive. On voit que dans ces oscillations successives du pendule, il y a toujours transformation de travail en force vive pendant que le pendule se rapproche de la verticale, et transformation inverse pendant qu'il s'en éloigne.

Il est maintenant facile de comprendre pourquoi un fil supportant un poids ne se comporte pas de la même façon, suivant que le poids produit une extension progressive ou est abandonné brusquement à lui-même.

Prenons un fil attaché en A à un point fixe et supportant en B un corps pesant. Ce fil a toujours une certaine élasticité, il s'allongera sous la traction qu'il subit et le point B viendra en B'; à ce moment, le poids du corps est équilibré par la résistance du fil à la rupture. Plaçons la main sous le poids et soulevons-le jusqu'en B, puis abandonnons-le brusquement à lui-même; nous avons dit qu'il arrivait souvent que le fil se rompe. En effet, en passant de B en B', l'attraction terrestre sur le corps B est supérieure à la traction exercée par le fil; le corps B va donc pendant ce trajet emmagasiner du travail sous forme de force vive, il arrivera en B' avec une certaine vitesse, comme le pendule oscillant arrive à la verticale. Le corps pesant ne s'arrêtera pas à la position d'équilibre B', il la dépassera jusqu'en un point B'', le parcours B'B'' donnant lieu à une transformation de force vive en travail. On voit par conséquent que le fil AB subira un allongement plus considérable que lorsque le corps B est abandonné doucement à lui-même, il pourra donc arriver qu'il y ait rupture.

Pourquoi maintenant dans l'expérience de la sphère, est-ce le brin inférieur qui casse quand on lui donne une secousse brusque? Une force quelconque exerçant son action sur la sphère tend à la déplacer, mais ce déplacement exige un certain temps, l'inertie de la sphère n'est pas vaincue instantanément, et le mouvement se produit d'autant moins vite que la force agissante est plus faible. Or, il peut arriver, si l'expérience est bien réglée, que la secousse nécessaire pour casser le fil ne produise pas de traction suffisante pour entraîner la sphère avec assez de vitesse; cette sphère restant en arrière, le fil qui l'entraîne casse avant d'avoir produit un déplacement appréciable, le lien supérieur ne sera donc pas étendu et résistera.



Fig. 23.

Choc.

Lorsque, au lieu d'arrêter un corps en mouvement d'une façon progressive, en lui faisant dépenser doucement le travail emmagasiné sous forme de force vive, on lui oppose brusquement un obstacle, il y a choc.

Il y a à considérer deux cas suivant que l'obstacle est fixe ou est mobile.

Supposons d'abord l'obstacle fixe. Au moment du contact du corps mobile et de l'obstacle, le corps mobile sera soumis à l'influence d'une force de sens contraire à son mouvement de propagation; il ne s'arrêtera pas brusquement, mais, continuant son chemin, il en résultera une déformation au contact des deux corps. Il y aura donc dépense de travail, comme dans le cas de l'arrêt progressif du wagon, seulement le chemin parcouru sera en général très faible et, par conséquent, les forces au contact des deux corps très grandes.

Il se produira alors divers phénomènes. Si les corps en jeu sont mous, ou si l'un d'eux au moins l'est, sa déformation sera permanente. Supposons par exemple que l'on donne un coup de marteau sur un morceau de plomb, le plomb se déforme, et cette déformation persiste.

Si le corps n'est pas mou, il se déformera élastiquement, puis, arrivé à son maximum de déformation, si les forces en jeu n'ont pas dépassé certaines limites, le corps reprendra sa forme primitive, le travail se restituant de nouveau en force vive, mais avec une direction inverse de la vitesse. Par exemple, une balle élastique tombe d'une certaine hauteur sur un sol rigide; au moment du contact, elle se déformera jusqu'à ce que toute sa force vive ait été transformée en travail, puis, tendant à reprendre sa forme primitive, elle réagira contre le sol avec une force égale à celle qui a été nécessaire pour la déformer et rebondira à une hauteur égale à celle d'où elle est tombée, si aucune cause étrangère ne trouble le phénomène. Dans un autre cas, prenons un corps et lançons-le contre un ressort; au moment du contact, le ressort se déformera avec dépense de travail, puis renverra le projectile en sens inverse de sa propagation primitive : on peut dire que le ressort emmagasine la force vive sous forme de travail pour la rendre après coup.

Des ex
citer la
soit viole
pour cet
arrive à l

On co
quelle es
naissant
de résista
ces corp
chemin
l'effort e
rigide, l
Il en rés
lorsqu'un
constaté
au conta

En ré
travail d
emmagas
s'est pr
aucun s

Dans
corps ch
dans le
corps ch

Les c
effets le
matière
ces deu

Voye
varie. L
toujour

et l'exp
augmen
que si
ment p
Si, au
cera fo
de con

Des exemples de chocs de cette nature abondent; il suffira de citer la balle des enfants ou le billard. Mais il arrive que le choc soit violent, ou que les organes choqués ne soient pas construits pour cet usage, alors les limites d'élasticité sont dépassées et on arrive à la rupture.

On comprend maintenant pourquoi il est impossible de dire quelle est la force produite par le choc d'un corps, quoique connaissant sa masse et sa vitesse; cette force dépend des conditions de résistance entre le corps choqué et le corps choquant. Si un de ces corps au moins est relativement facilement déformable, le chemin parcouru par le mobile pendant le choc sera grand et l'effort exercé faible. Ce même mobile rencontrant un corps plus rigide, l'effort sera plus grand et le chemin parcouru plus petit. Il en résulte cette remarque, au premier abord paradoxale, que, lorsqu'un corps choquant a heurté un obstacle, l'étendue du dégât constaté après le choc est d'autant plus grande que l'effort exercé au contact des deux corps a été plus petit.

En résumé, lors d'un choc, on peut dire qu'il s'est dépensé un travail d'un nombre donné de kilogrammètres; mais, du travail emmagasiné, il est absolument impossible de déduire la force qui s'est produite au moment du choc; un problème ainsi posé n'a aucun sens.

Dans le cas où le corps choqué est mobile, la force vive du corps choquant sert à des déformations au point de contact comme dans le cas précédent; mais, en plus, elle se transmet en partie au corps choqué qui prend une certaine vitesse.

Les effets du choc sur le corps choqué se divisent donc en effets locaux, destructeurs ou non, suivant la constitution de la matière des corps, et en effets de projection. La répartition entre ces deux effets dépend de la masse des corps en jeu.

Voyons d'abord ce qui se passe quand la masse du corps choqué varie. Pour cela, supposons, bien entendu, que le choc vienne toujours d'un même corps animé d'une même vitesse. Le calcul et l'expérience font voir que lorsque la masse du corps choqué augmente, les effets destructeurs locaux augmentent, c'est-à-dire que si le choc porte sur un très petit corps, ce corps sera vivement projeté dans le sens du choc, mais sans déformation sensible. Si, au contraire, ce corps choqué a une grande masse, il se déplacera fort peu, d'autant moins qu'il est plus lourd, mais au point de contact du choc il y aura une déformation de plus en plus

grande. Voici un exemple de ce fait : prenons un marteau et frappons-en divers corps, nous verrons que de petits clous seront facilement enfoncés dans le bois sans se déformer; qu'un choc horizontal contre une petite bille la projette sans l'endommager. Mais à mesure que nous prendrons des clous ou des corps de plus en plus gros, nous verrons que les clous s'enfoncent plus difficilement avec le même marteau, que leur tête se déforme plus rapidement, et qu'en voulant projeter par choc des pierres de plus en plus grosses comme on le faisait tout à l'heure avec les petites billes, elles se déplacent de plus en plus difficilement, et finissent même par se briser plutôt que d'entrer en mouvement.

Naturellement, nous allons observer l'inverse, si, passant du corps choqué au corps choquant, nous faisons varier la masse de ce dernier.

Quand cette masse sera faible, les effets de projection seront également faibles, les effets au contact relativement grands; si la masse augmente, les effets de projection augmenteront aussi par rapport aux effets au contact. Ainsi, pour enfoncer un clou, un marteau lourd donne de bons effets; un marteau léger déformera la tête du clou avant de l'enfoncer; aussi sera-t-il avantageux pour river. De même, quand on veut enfoncer des pieux au mouton, un mouton léger déforme les têtes de pieux, les brise et donne un mauvais usage; un mouton lourd permet au contraire de les battre impunément, ils sont chassés devant lui.

En résumé, chaque fois que l'on voudra projeter un corps, il faudra le choquer avec un corps lourd; si l'on veut y produire une déformation locale, il faut le choquer avec un corps léger. Autrement dit, pour renverser un mur, il faut un projectile lourd; pour le percer, un projectile léger et rapide.

Nous avons vu plus haut que lors des chocs entre corps imparfaitement élastiques, il se produisait des déformations permanentes absorbant du travail sans le rendre en force vive; par conséquent, chaque fois que des corps juxtaposés devront servir à transmettre du travail, il faudra éviter ces chocs. Supposons, par exemple, un attelage trainant une voiture; la traction n'est jamais continue, si les chocs qui en résultent donnent lieu à des déformations permanentes, une partie du travail fourni par l'attelage est dépensée en pure perte. Si, au contraire, les liens sont élastiques, sous l'influence d'une traction brusque ils s'allongeront, emmagasineront du travail, qu'ils rendront sous forme de force vive par une

tractio
par M
trans
ques.
lectu

En
avons
l'em
défa
lieu à
maga
entre

De
résist
pas e
dans.

Pr
cant
libre,
n'en
valeu
const
certai
trava

de la
De
L'exp
en co
contr
réacti
appli
force
à la
l'éter
il fau
un ce
du fr

traction douce sur le véhicule. Ces faits, soumis à l'expérience par M. Marey, ont reçu une confirmation éclatante; dans toute transmission de travail, il faut absolument éviter des chocs brusques. L'importance de ce fait sera encore mieux saisie après la lecture du paragraphe consacré à l'élasticité des corps.

Frottement.

En étudiant la transformation du travail en force vive, nous avons vu que tout le travail dépensé devrait se retrouver intégralement sous forme de force vive. Cette loi paraît souvent en défaut. Nous venons de voir que le choc entre corps mous donne lieu à une disparition de force vive sans qu'il soit possible d'emmagasiner le travail correspondant comme cela a lieu dans le choc entre corps élastiques, et de l'utiliser ultérieurement.

De même quand une force déplace un corps, soumis à certaines résistances, il arrive que tout le travail dépensé ne se retrouve pas en force vive équivalente. C'est ce qui a lieu, par exemple, dans le cas du frottement.

Prenons le cas le plus simple. Soit une force horizontale déplaçant un poids posé sur une table. Si le corps était absolument libre, il prendrait une vitesse et une force vive croissantes, or il n'en est rien. Par suite du frottement, la vitesse se limite à une valeur en relation avec la grandeur de la force et reste alors constante quoique la force continue à agir. Il y a donc perte d'une certaine quantité de travail. Nous verrons ce que devient ce travail, à propos de ce que l'on nomme l'équivalence mécanique de la chaleur.

De quels éléments dépend cette résistance de frottement? L'expérience a fait voir qu'elle varie avec la nature des surfaces en contact, et avec la grandeur de la force qui applique l'une contre l'autre les deux surfaces frottantes. Cette force est dite la réaction normale. Prenons deux corps de nature déterminée, appliquons-les l'un contre l'autre et opérons un glissement, la force nécessaire pour produire ce glissement sera proportionnelle à la réaction normale N entre les deux corps, *quelle que soit l'étendue des surfaces en contact*. Pour chaque espèce de corps, il faudra, pour avoir la résistance au glissement, multiplier N par un certain nombre α donné par l'expérience et appelé coefficient du frottement.

Par exemple, le coefficient de frottement du bois sur le bois est 0,36; si deux morceaux de bois sont appliqués l'un contre l'autre par des surfaces planes avec une force de 10 kg. l'effort nécessaire pour les faire glisser l'un sur l'autre sera $10 \times 0,36 = 3$ kg. 6. Que va-t-il donc se passer lorsqu'une force sera appliquée à un corps non plus absolument libre, mais assujéti à glisser sur un autre corps fixe? Il faudra évidemment retrancher de la force agissante la force résistante passive, due au frottement. Il se produira divers cas. Soit f la valeur du frottement, si la force agissante n'atteint pas f , le corps restera au repos. Si elle a une valeur F supérieure à f , le corps prendra un mouvement uniformément accéléré sous l'action d'une résultante $F-f$. Si, à un moment donné, F devient égal à f , le mouvement du corps sera uniforme à partir de ce moment, la force F ne communiquera plus au corps aucune accélération, tout le travail qu'elle produira sera absorbé au fur et à mesure par le frottement dont la force est dirigée en sens contraire de F .

Il faut ajouter que le coefficient de frottement ne dépend pas seulement de la nature des corps, et lorsque, plus haut, j'ai dit que les coefficients de frottement du bois sur le bois étaient 0,36, cela voulait dire qu'il était supposé tel dans les conditions de l'expérience. Il est évident, en effet, que l'état des surfaces a une importance capitale : deux morceaux de fer venus de fonte ne glisseront pas l'un contre l'autre comme ils le feront après polissage. De plus, il est bien connu qu'en introduisant entre les deux corps frottants un troisième corps dit lubrifiant, on modifie complètement les conditions de glissement. Les nombres donnés dans les tables de coefficients ne s'appliquent qu'au cas de l'expérience à l'aide de laquelle ils ont été déterminés, et ne peuvent donner qu'une approximation pour les autres cas, avec la condition de se mettre autant que possible dans les conditions de la première détermination.

Il n'y a pas que le frottement de glissement qui se rencontre comme résistance passive; nous avons encore d'autres causes très importantes, parmi lesquelles le frottement de roulement et la résistance des fluides.

Quand un corps rond, cylindre, sphère, etc., roule sur un plan par exemple, au premier abord on ne voit pas d'où peut provenir une résistance passive; il est pourtant d'expérience courante qu'une bille lancée sur le plan le plus parfait finit par

s'arrê
En
poids
petite
ment
creus
repos
Si
petit
suite,
par s
force
absor
entre
Il
lois g
lemer
faces
Malgr
chaq
roule

Il
mach
méca
tions
tifs,
passi
faible
dépla
ampl
méca
toujo
prop
Le
extrê
aucu

s'arrêter, plus ou moins vite suivant la nature des surfaces.

En réfléchissant à ce fait, il est évident que, par suite du poids du corps roulant, il se produit à la surface du plan une petite dépression momentanée. Aucun corps solide n'est absolument rigide, et la sphère comprimant le plan en un point se creuse pour ainsi dire une petite loge au fond de laquelle elle repose.

Si la bille vient à rouler, elle rencontre sans cesse devant elle un petit talus qu'elle est obligée de surmonter en l'écrasant; par suite, elle produit du travail en dépensant sa force vive, elle finit par s'arrêter si elle est libre. Si elle est soumise à l'action d'une force agissante, cette force doit dépenser sans cesse du travail absorbé au fur et à mesure par le frottement de roulement pour entretenir le mouvement.

Il est impossible de donner pour le frottement de roulement des lois générales comme celles que nous avons données pour le frottement de glissement. Ce n'est pas seulement la nature des surfaces qui intervient dans le roulement, mais aussi leur forme. Malgré les nombreuses expériences faites à cet égard, il faut, dans chaque cas particulier, déterminer les forces passives dues au roulement.

Machines.

Il existe un certain nombre de dispositifs connus sous le nom de machines. Ces machines sont destinées à transformer du travail mécanique. On démontre en effet que dans toutes les transformations que peut subir le travail mécanique à l'aide de ces dispositifs, sa valeur reste constante, abstraction faite des résistances passives, comme les frottements. Il pourra arriver qu'à l'aide de faibles efforts on produise des forces énormes, ou que le petit déplacement d'un organe donne lieu à un mouvement d'une amplitude considérable; mais de toute façon, en évaluant le travail mécanique fourni à la machine et celui qu'elle rend, on trouvera toujours la même valeur. La lecture de ce qui suit rendra cette proposition plus claire.

Le nombre des machines usitées en mécanique appliquée est extrêmement considérable, mais la plupart d'entre elles n'ont aucun intérêt pour la mécanique animale. Nous nous contente-

rons de décrire celles dont on pourra trouver des applications dans l'étude du corps de l'homme et des animaux. Ces machines simples sont les poulies, le levier et le coin.

Poulie. — Dans la traction à l'aide de cordes, il arrive souvent que la force ne puisse s'exercer dans la direction à faire parcourir au corps; il en est ainsi par exemple lorsqu'on veut hisser un poids à une hauteur plus grande que celle où l'on se trouve. On replie alors la corde autour d'un point fixe et il est facile de concevoir comment le mouvement se transforme. En adoptant ce procédé simple, il en résulte au point de renvoi un frottement considérable et une usure de la corde. On évite ces inconvénients à l'aide de la poulie. On démontre que le frottement n'est ainsi que diminué, car il subsiste un frottement de l'axe et une résistance spéciale due à ce que l'on appelle la raideur de la corde. On constate en effet par l'expérience qu'en cherchant à soulever le même poids R à l'aide de la même poulie, il faut des forces différentes suivant la corde employée. Un examen même grossier fait voir que F est d'autant plus grand que la corde est plus raide; ainsi des cordes neuves exigent plus de force que des vieilles. Cela tient à ce que, par suite de leur rigidité, les cordes ne s'appliquent pas exactement sur la poulie au commencement du contact, la distance AO est plus grande que BO , et comme dans la rotation de la poulie, les forces F et R interviennent par leur moment par rapport au point O , F doit être d'autant plus grand que AO l'est, c'est-à-dire que la corde a plus de raideur.

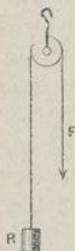


Fig. 21.

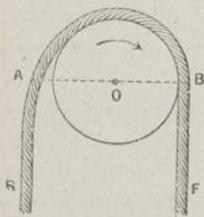


Fig. 25.

A part ces frottements que l'on peut beaucoup diminuer en graissant bien l'axe et prenant une corde souple, la force motrice se transmet intégralement; l'effet sur le brin résistant est sensiblement le même que si la traction se faisait directement.

Mais la poulie peut s'employer d'une façon différente; en effet, renversons-la et rendons fixe un des bouts O de la corde (fig. 26). la traction F se faisant de bas en haut et le poids à soulever R étant suspendu à la poulie.

Abstraction faite des frottements, le brin PO est soumis à une

force F comme il vient d'être dit précédemment. Nous savons que la composante de ces deux forces F leur est parallèle et égale à $2F$; c'est cette force $2F$ qui fait équilibre au poids R .

Par conséquent, à l'aide de cette disposition, on peut soulever un poids sensiblement double de la force motrice.

Il ne peut y voir ni perte ni gain de travail, le travail fourni par F doit se transmettre intégralement à R ; par conséquent, comme R a une valeur double de F , le chemin parcouru par R doit être moitié de celui parcouru par F . Il est aisé de voir sur la figure que pour élever le centre C de la poulie de CC' , il faut faire parcourir à la force un chemin $2CC'$.

On exprime cela en disant que ce qui se gagne en force se perd en chemin parcouru.

Si l'on disposait d'une force considérable et que l'on veuille, contrairement au cas précédent, gagner du chemin, on renverserait l'appareil, appliquant la force motrice F à la poulie et suspendant R au bout de corde libre.

On peut ne pas se borner à une seule poulie mobile, mais se servir de la première pour exercer une traction sur le bout libre d'une deuxième poulie, et ainsi de suite; chaque poulie aura pour effet de doubler la force, en diminuant dans la même proportion le chemin parcouru.

Ainsi la figure 27 représente une association de trois poulies; ce dispositif suffit pour développer une force huit fois plus grande que la force motrice. On conçoit combien sont considérables les forces que l'on peut obtenir ainsi.

Cette combinaison est un peu encombrante; il y en a une autre, dans laquelle il n'y a qu'un point fixe, toutes les poulies étant montées sur deux axes, mais elle ne permet pas de multiplier la force aussi rapidement que par la méthode précédente.

Prenons, par exemple, le cas de la figure 28: il y a trois poulies sur l'axe supérieur et trois poulies sur l'axe inférieur. La corde est attachée au crochet fixe O , elle va passer sur la 1^{re} poulie inférieure, puis sur la 1^{re} supérieure, la 2^e inférieure et la 2^e supérieure, etc.; finalement le bout libre part de la 3^e poulie supérieure. Supposons que sur ce bout libre on exerce une traction F , cette traction est transmise à chaque brin; comme il y en a six,

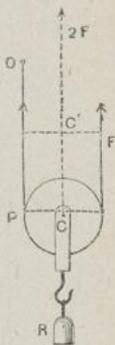


Fig. 26.

autant que de poulies; la résultante de toutes ces forces dirigée de bas en haut est $6F$. Par conséquent, on peut, à l'aide de ce

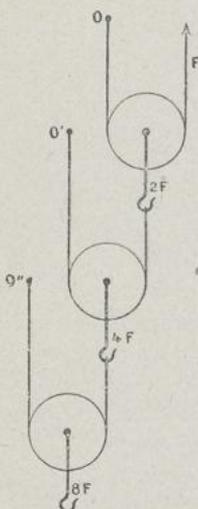


Fig. 27.

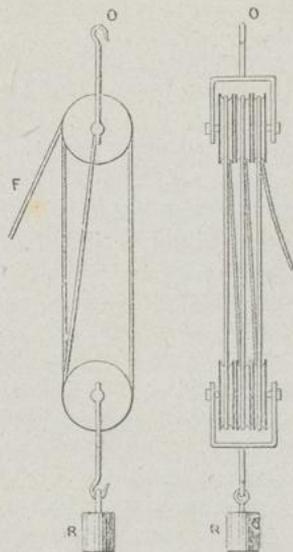


Fig. 28.

procédé, multiplier la force par le nombre de poulies employé. Cette combinaison est connue sous le nom de moulles.

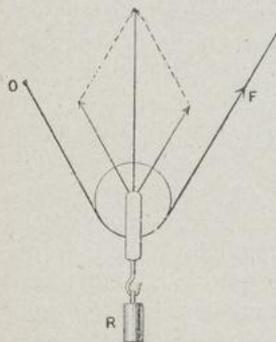


Fig. 29.

figure 29 on voit qu'on n'a plus affaire à une composition de forces parallèles, mais de forces concourantes en un point. Il

Nous avons supposé jusqu'ici que le brin moteur et le brin résistant étaient parallèles pour la poulie fixe; il n'y a rien de changé quand cela n'est plus, la transmission de force se fait toujours intégralement. Dans le cas de la poulie mobile, il en est de même au point de vue de la transmission de la force du brin moteur au brin fixe, mais la résultante de ces deux forces, et par suite le poids qu'il est possible de soulever, n'est plus égale à leur somme; en jetant les yeux sur la

suffi
F en
constr
connu
doubl
les de
Ce
invers
corde
consid
deux
emple
corde.
un ef
cette
pour
subira
en de
brins,
mité
comp
qu'ell
cée, c
princi
l'on v
consid
d'exer
très c

Lex
rigide
ligne,
d'une
puie p
suppo
un au
P s'ex
On
déplac
On

suffit, pour trouver la résultante, de transporter les deux forces F en un même point, par exemple sur l'axe de la poulie, et de construire la parallélogramme des forces suivant la méthode connue : on voit alors que la résultante n'est jamais égale au double de F , et qu'elle s'en écarte d'autant plus que les deux brins sont plus obliques.

Ce dispositif s'emploie souvent en sens inverse lorsqu'il s'agit, à l'aide d'une corde tendue, d'exercer un effort très considérable. Soit une corde tendue entre deux points A et B (fig. 30); sans même employer la poulie, exerçons sur la corde, au voisinage de son milieu M , un effort F perpendiculaire à la corde, cette corde va se tendre davantage, et, pour voir quelle est la traction qu'elle subira ainsi, il suffit de décomposer F en deux forces dirigées suivant les deux brins, c'est-à-dire de mener par l'extré-

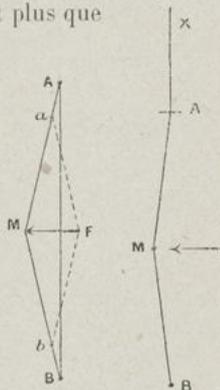


Fig. 30.

mité de F deux parallèles aux deux brins. On a ainsi les deux composantes aM , bM , et il suffit de regarder la figure pour voir qu'elles sont d'autant plus grandes que la corde s'est moins déplacée, c'est-à-dire qu'elle était déjà plus tendue. Voici comment ce principe s'applique dans la pratique. On fait passer la corde que l'on veut tendre dans un anneau A et, exerçant une traction aussi considérable que possible, on l'attache en B . Il suffit ensuite d'exercer en M un effort transversal pour produire une traction très considérable sur AX .

Levier. — Le levier se compose essentiellement d'une pièce rigide que nous supposons rectiligne, par exemple d'un bâton ou d'une barre de fer. Cette tige s'appuie par un de ses points sur un support fixe A nommé l'*appui*. En un autre point R se trouve la *résistance* à vaincre. Enfin en P s'exerce la force agissante que l'on nomme la *puissance*.



Fig. 31.

On voit immédiatement que dans le cas de la figure la force P déplacera le point R de bas en haut si le point A est fixe.

On a cherché à établir une classification dans les leviers sui-

vant les positions respectives des trois points A, P, R, et l'on a distingué des leviers du premier, du second et du troisième genre.

Dans le levier du premier genre, le point d'appui se trouve entre la puissance et la résistance. Dans celui du deuxième

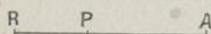
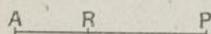
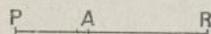


Fig. 32.

genre, la résistance est au point intermédiaire, et dans le troisième genre ce point est occupé par la puissance.

En réalité, au point de vue mécanique, cette distinction n'a aucun intérêt. Ce qui importe dans chaque cas, c'est de savoir quelle résistance on peut vaincre à l'aide d'une puissance donnée P. Cela revient à chercher quelle résistance fait équilibre

à la puissance, ou dans quelles conditions ces deux forces ont même moment par rapport au point fixe.

Appelons p la distance de la puissance au point fixe, r la distance de la résistance, exprimons que les deux moments sont égaux, nous aurons :

$$Pp = Rr,$$

ou bien :

$$\frac{P}{R} = \frac{r}{p},$$

c'est-à-dire que les forces sont en raison inverse de leur distance au point fixe. On exprime cela en disant que plus le bras de levier est long, moins la force correspondante est grande; si on double un bras de levier, on peut réduire de moitié la force et obtenir le même effet. Mais naturellement, lorsqu'il s'agit de déplacer le point d'application de la résistance d'une certaine quantité, par exemple de soulever un poids d'une certaine hauteur, plus la force que l'on emploie est petite, plus le déplacement qu'il faut faire subir au point d'application de cette puissance est grand.

Ainsi, dans le cas de la figure 33, nous avons représenté deux positions d'un levier.

Pour soulever le poids R, on pourra employer la force P ou une force moitié moindre P'; mais pour obtenir le même déplacement de R, P' devra faire un chemin double de P. C'est encore le prin-

cipe de
duire
parcou
En
leviers
mais c



Il p
conqu
en pr
d'app
sur le
abaiss
Ou
chaqu
produ
perpen
prend
On
sera q
que le
forces
égaux
du po
être,
les fo
de lev
de lev

Coi
inclin
deux

cipe de transmission intégrale du travail qui s'applique; pour produire un même travail en R, le produit de P par le chemin qu'il parcourt doit toujours être le même.

En général, comme nous l'avons supposé sur les figures, les leviers sont rectilignes et les forces perpendiculaires au levier; mais ces deux conditions peuvent se trouver changées.

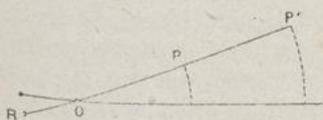


Fig. 33.

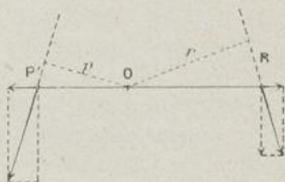


Fig. 34.

Il peut arriver d'abord que les forces aient des directions quelconques par rapport au levier (fig. 34). L'équilibre s'obtient encore en prenant les moments des deux forces par rapport au point d'appui fixe, c'est-à-dire en ne comptant pas les longueurs p et r sur le levier, mais en prenant pour ces valeurs les perpendiculaires abaissées de O sur les forces.

Ou bien, on peut ramener ce cas au précédent en décomposant chaque force en deux autres, une dirigée suivant le levier qui ne produira aucune rotation puisqu'elle passera par l'axe, une autre perpendiculaire au levier que l'on prendra seule en considération.

On fera de même quand le levier sera quelconque (fig. 35); on écrira que les moments Rr et Pp des deux forces par rapport au point O sont égaux, en prenant pour p et r les perpendiculaires abaissées du point fixe sur les forces R et P. Ou bien, ce qui pourrait être, chacune plus commode dans certains cas, on décomposera les forces R et P en deux autres, dirigées l'une suivant le bras de levier correspondant et l'autre perpendiculairement à ce bras de levier.

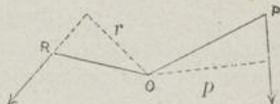


Fig. 35.

Coin. — Le coin est un corps solide terminé par deux plans inclinés AB et AC (fig. 36), que l'on introduit de force entre deux corps résistants R et R', pour les séparer l'un de l'autre.

Au point de contact du coin et des deux corps R et R', ce coin subit de la part de ces corps des réactions f et f' normales aux surfaces AB et AC. La composante de f et f' doit faire équilibre à



Fig. 36.

F. Nous aurons par suite la valeur de f et de f' en prenant une longueur OF parallèle et égale à F (fig. 37), puis traçant deux lignes OX et OY parallèles à f et f' de la figure précédente. Il suffit ensuite de mener par l'extrémité F de OF deux lignes Ff et Ff' complétant le quadrilatère, comme cela résulte de la loi de composition et de décomposition des forces, pour avoir la valeur des réactions f et f' des corps R et R' contre le coin. Il est bien évident que ces réactions sont égales aux actions que le coin exerce sur les corps R et R' pour les écarter l'un de l'autre.

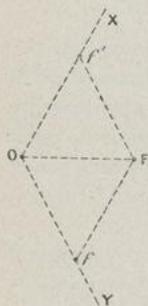


Fig. 37.

On voit immédiatement que, prenant une même force F, f et f' sont d'autant plus grands que l'angle fOf' est plus ouvert, c'est-à-dire que l'angle ABC du coin est plus petit.

Avec un angle BAC faible, on peut arriver à développer des efforts énormes.

Mais ici encore on perd en chemin parcouru ce que l'on gagne en force. Il suffit en effet de regarder la figure pour voir qu'avec un coin à faible angle il faudra, pour obtenir un même écartement de R et R', faire avancer le coin d'autant plus que cet angle A est plus petit.

II

DENSITÉS

Densité des solides et liquides. — La densité d'un solide ou d'un liquide est le rapport entre le poids d'un certain volume de ce solide ou de ce liquide et le poids du même volume d'eau. Autrement dit, la densité d'un solide ou d'un liquide indique combien de fois ce solide ou ce liquide pèse plus que le même volume d'eau. Si donc on veut avoir le poids d'un corps, on cherche combien pèse

le même volume d'eau et on multiplie ce poids par la densité du corps.

D'autre part, si l'on veut avoir la densité d'un corps on cherche son poids, ce qui est facile, et on détermine le poids du même volume d'eau. En divisant l'un par l'autre on a la densité.

Les traités de physique générale indiquent comment se font ces opérations. Quand on a pesé un corps solide (1^{re} opération), pour avoir le poids du même volume d'eau (2^e opération), on plonge le corps dans l'eau et l'on cherche quelle est sa perte de poids apparente, pendant qu'il est ainsi immergé. Le principe d'Archimède nous apprend que cette perte de poids est égale au poids du volume d'eau déplacé par le corps.

Pour les liquides on mesure un certain volume du liquide soumis à l'expérience, au moyen d'un vase gradué et l'on pèse ce volume. Puis on répète la même opération avec de l'eau.

Il y a des appareils nommés densimètres ou aréomètres qui permettent de déterminer rapidement la densité d'un liquide par une simple lecture. Voici comment sont disposés ceux que l'on utilise généralement en médecine.

Ils consistent en un flotteur de verre ayant la forme représentée sur la figure 38, lesté à la partie inférieure de façon à prendre, en flottant dans les liquides, une position verticale. Ces aréomètres plongent jusqu'à un niveau déterminé de la tige, variable suivant la densité du liquide sur lequel on opère. En effet le poids de l'instrument est constant, il doit donc plonger jusqu'à ce que le poids de liquide déplacé par lui soit égal à son propre poids, c'est-à-dire qu'il doit s'enfoncer d'autant plus que le liquide est moins dense. Il suffit dès lors de faire sur la tige une graduation correspondant aux diverses densités pour pouvoir, lors d'une expérience, connaître cette densité par une simple lecture.

Pour avoir des instruments sensibles, la tige ne doit pas avoir un trop fort diamètre, afin qu'il faille une variation de niveau assez grande pour produire une variation donnée de volume d'immersion. Plus la tige d'un aréomètre est de faible diamètre, et plus l'appareil est sensible. Il en résulte que, pour ne pas exiger des tiges trop longues, il faut avoir une série d'aréomètres, chacun d'eux n'étant applicable qu'à une variation assez limitée de la densité. Il en est de même pour les thermomètres;



Fig. 38.

pour avoir des degrés assez écartés, on est obligé de limiter l'échelle de température dans laquelle un thermomètre peut être employé.

On fait des instruments basés sur ce principe et destinés aux mesures de densités voisines de celle de l'urine normale, ils portent le nom de pèse-urine; de même on fait des pèse-lait pour les densités voisines du lait, etc.

La densité de l'urine normale est au voisinage de 1,018. Les pèse-urines sont gradués généralement de 1,001 à 1,040, car ce n'est qu'entre ces limites que varie la densité de l'urine.

Dans certains cas spéciaux, par exemple pour étudier les mélanges d'alcool et d'eau, au lieu de faire sur la tige une graduation donnant la densité, on fait la graduation en richesse alcoolique, on peut alors lire directement le titrage d'une liqueur en alcool. Pour cela, il faut, bien entendu, qu'elle ne contienne que de l'alcool et de l'eau, car c'est dans ce cas seulement qu'à une même densité correspond un même titre de la solution; la présence de toute matière étrangère fausserait complètement les indications de l'instrument. On a alors un pèse-alcool ou alcoomètre. On peut de même

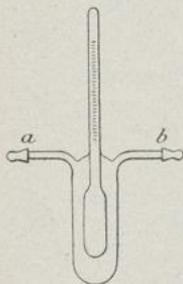


Fig. 39.

construire des pèse-acide donnant la richesse d'une liqueur en tel ou tel acide.

Les aréomètres Baumé, Cartier, etc., sont des instruments du même genre, ne différant les uns des autres que par la graduation, comme diffèrent les thermomètres centigrade, Réaumur, etc. Des tables spéciales donnent la correspondance de ces divers instruments.

Naturellement les liquides se dilatant sous l'influence de la température, il y a lieu de tenir compte de cette influence dans les mesures délicates. On peut alors se servir avec avantage d'un *picnomètre*. C'est un réservoir en verre muni de deux petits ajutages coiffés d'un chapeau rodé à l'émeri et contenant la boule d'un thermomètre (fig. 39). On remplit l'appareil du liquide à étudier, en y plongeant un des ajutages, *a* par exemple, et aspirant en *b*. On pèse le tout et on lit la température. Une table à double entrée, dressée une fois pour toutes, donne la densité du liquide correspondant aux divers poids de l'instrument pour les différentes températures.

Remarque sur les densités.— Si, pour prendre la densité d'un solide ou d'un liquide on opère sur 1 cm^3 de corps, le poids du même volume d'eau sera 1 g., la densité du corps sera donc exprimée par le même chiffre que le poids en gramme du centimètre cube de corps. Ainsi si la densité du corps est 7,8, cela voudra dire que le centimètre cube de corps pèse 7 g. 8 dg. On peut faire le même raisonnement sur les décimètres cubes, le corps pèsera alors 7 kg. 8 par décimètre cube, et ainsi de suite. Ce résultat simple est obtenu grâce au choix des unités françaises et du corps par rapport auquel on prend la densité. Nous verrons qu'il n'en est plus de même pour les gaz.

III

ÉLASTICITÉ

Tous les corps de la nature, quelle que soit leur rigidité, peuvent être déformés par l'action de forces extérieures. Suivant les cas ces forces devront être plus ou moins puissantes; un effort minime suffit pour plier une lame de caoutchouc, tandis que, pour obtenir le même résultat sur une barre d'acier, il faut déployer une force considérable.

Les corps ne diffèrent pas seulement entre eux par leur résistance plus ou moins grande à la déformation, mais aussi par la faculté qu'ils ont de reprendre leur forme primitive quand la force extérieure a cessé d'agir. Une lame de plomb plie sous le moindre effort, et la flexion ainsi obtenue sera persistante. La cire à modeler présente le même phénomène à un degré encore plus élevé, c'est un des exemples les plus parfaits de ce que l'on appelle un *corps mou*, c'est-à-dire d'un corps sur lequel toute déformation est permanente. Si l'on répète la même expérience sur un morceau de caoutchouc ou sur une pièce d'acier convenable trempée, on constate que ces corps reprennent complètement leur forme primitive quand les forces extérieures cessent d'agir : on dit alors qu'ils sont *parfaitement élastiques*.

En réalité, comme nous le verrons plus loin, il n'y a ni corps parfaitement mou ni corps parfaitement élastique et, si nous rencontrons dans la nature un corps se rapprochant de cette état idéal,

ce n'est qu'à titre d'exception. On peut voir en effet que, même sur la cire molle lorsque les déformations sont petites, il y a un vestige d'élasticité, un bâton de cire légèrement plié a une tendance à se redresser. Au contraire un corps comme le caoutchouc, doué en apparence d'une élasticité parfaite est susceptible de conserver de petites déformations permanentes.

Sur la plupart des corps de la nature, ces deux phénomènes, tendance au retour vers la forme primitive et persistance d'une déformation permanente, se montrent donc simultanément, l'un ou l'autre prédominant suivant les conditions de l'expérience.

Prenons une tige de cuivre : en ne la pliant que très légèrement elle se redressera parfaitement, mais si, par un effort énergique, nous la courbons fortement, elle restera déformée comme le ferait une tige de plomb. Il en est de même pour tous les corps : dans certaines limites de déformation ils sont parfaitement élastiques, mais quand cette déformation devient par trop grande, elle devient plus ou moins permanente. On dit alors qu'on a dépassé la limite d'élasticité.

Jusqu'ici nous n'avons considéré que le changement de forme des solides, car ce sont les seuls corps ayant une forme propre, mais les liquides et les gaz peuvent aussi manifester leur élasticité quand on cherche à modifier leur volume.

Prenons d'abord les gaz, et, pour préciser, supposons que nous ayons enfermé un certain volume d'air dans un corps de pompe parfaitement fermé par un piston, nous savons que l'air prendra la forme intérieure du corps de pompe dans lequel il se répandra uniformément. Si nous abaïssons le piston, le volume de l'air se réduira; mais, en vertu de son élasticité, il reprendra sa valeur primitive aussitôt que la force cessera d'agir.

La même expérience peut se faire avec un liquide; il suffira pour cela de remplir complètement le corps de pompe d'eau, en ne laissant aucune bulle d'air.

On constate ainsi que les liquides et les gaz ont, lorsqu'on cherche à réduire leur volume, une élasticité parfaite, on ne peut leur faire subir une déformation permanente, le volume reprend toujours la même valeur quand la pression revient au même point.

Il y a toutefois une grande différence entre la compression des gaz et celle des liquides. Les premiers suivent, comme on sait, la

loi d
rabler
pour
forces
Po
cherch
déplo
l'exp
plus
inter
de fo
tracti
Co
pris
fixée
par e
Qu
secti
l'allo
tradu
barre
La lo
conce
subis
d'aut
guez
mêm
s'allo
nom
corps
mêm
moin
que
force
duit
le ca
La
E =

loi de Mariotte; sans effort exagéré on peut en diminuer considérablement le volume. Il n'en est pas de même des liquides, pour lesquels des réductions de volume même faibles exigent des forces de compression énormes.

Pour les solides, on peut aussi, au point de vue expérimental, chercher à réduire leur volume. Comme pour les liquides il faut déployer de très grands efforts, et l'on constate alors, qu'après l'expérience, il subsiste une réduction de volume permanente plus ou moins accusée. Dans la pratique, l'élasticité des solides intervient surtout d'une façon intéressante dans les modifications de forme, sans changement de volume, qu'ils peuvent subir par traction, torsion, flexion ou toute autre déformation.

Considérons d'abord le cas d'une traction exercée sur une barre prismatique ou cylindrique. Cette barre placée verticalement sera fixée solidement à son extrémité supérieure; nous l'allongerons, par exemple, en suspendant des poids à son extrémité inférieure.

Quand la tige pendra librement, elle aura une longueur L et une section S . Si le poids tenseur est P , l'expérience prouve que l'allongement sera donné par la formule $l = \frac{LP}{ES}$ qu'il est facile de

traduire en langage ordinaire. Elle signifie que l'allongement d'une barre soumise à la traction est proportionnelle au poids tenseur P . La longueur de la barre intervient de la même façon, ce que l'on conçoit aisément; chacune des unités de longueur de la barre subissant évidemment la même action, l'allongement total sera d'autant plus grand que cette barre contient plus d'unités de longueur. La surface de section joue un rôle inverse; dans les mêmes conditions, plus la section sera grande et moins la barre s'allongera. Enfin nous voyons intervenir un facteur E que l'on nomme le *coefficient d'élasticité* et qui dépend de la nature du corps soumis à l'expérience. Pour un même poids tenseur, une même longueur et une même section, l'allongement sera d'autant moindre que le coefficient d'élasticité est plus grand. Il en résulte que les corps ayant un grand coefficient d'élasticité exigent des forces très considérables pour être déformés: c'est ce qui se produit pour l'acier. Les corps à faible coefficient d'élasticité, comme le caoutchouc, cèdent au contraire sous le moindre effort.

La formule d'allongement élastique d'une tige peut s'écrire $E = \frac{LP}{lS}$. Si on suppose l'allongement l égal à la longueur L de

la tige, il reste $E = \frac{P}{S}$. Cela veut dire que le coefficient d'élasticité est égal au poids, par unité de section, qui serait nécessaire pour doubler la longueur de la tige, abstraction faite de la rupture qui se produit généralement avant que ce résultat soit atteint.

L'emploi du mot élasticité crée souvent une confusion par suite du sens différent qui lui est attribué dans le langage courant et dans le langage scientifique. Quand on parle d'un corps ayant une grande élasticité, l'image du caoutchouc se présente immédiatement à l'esprit; or, d'après ce que nous venons de dire plus haut, le caoutchouc a en réalité un coefficient d'élasticité très faible.

Un autre élément vient encore augmenter la confusion, c'est la *force élastique* qui, malgré l'analogie de nom, n'a rien de commun avec les propriétés des corps élastiques que nous avons déjà signalées. Lorsque nous exerçons sur un corps une traction P , s'il n'y a pas rupture, quelle que soit la déformation, le corps exerce sur le poids tenseur une réaction qui, d'après le principe de Newton, est égale et de sens contraire à la traction. Ainsi, si à une tige de matière, de longueur et de section quelconques, nous suspendons un poids de 4 kg.; cette tige, quel que soit son allongement, soutiendra 4 kg. et l'on dira qu'elle exerce une force élastique de 4 kg. On voit donc qu'il n'y a aucune relation entre ce que l'on nomme le coefficient d'élasticité d'un corps et la force élastique qu'il déploie. Le coefficient d'élasticité d'un corps dépend uniquement de la matière dont il est fait, c'est un facteur qui ne changera pas, quelles que soient les tractions ou déformations que l'on produira. La force élastique, au contraire, change à chaque instant avec les conditions de l'expérience, et elle est toujours égale et de sens contraire à la force qui produit la déformation. Prenons par exemple une tige d'acier fixée à une extrémité et pendant librement; au bout inférieur accrochons successivement les poids de 1, 2, 3 kg., etc., la tige exercera de bas en haut des tractions de 1, 2, 3 kg.; la force élastique qu'elle déploiera variera avec chaque nouveau poids tenseur, et cependant le coefficient d'élasticité n'a pas changé. Inversement, prenons deux tiges; l'une en acier, l'autre en caoutchouc, et faisons-leur supporter à chacune un poids de 1 kg., ces deux tiges mettront en œuvre la même force élastique, et cependant elles sont loin d'avoir le même coefficient d'élasticité.

Imp
mécar
forces
cemen
de lui-
avait e
tion d
force.
devant
peut é
chemin
le ress
que v
notre
même
l'opéra
le cher
même
l'arme
Il e
le doi
le res
tion d
il renf
la suit
Tou
trois p
tique,
sives
si, au
toujou
compt
Exa
élastiq
d'une
lentein
laisser
rant à
l'analy
que e

Importance de l'élasticité des corps dans les actions mécaniques. — Lorsqu'un corps se déforme sous l'action de forces extérieures, ces forces dépensent du travail, car il y a déplacement du point d'application des forces. Si le corps peut revenir de lui-même à sa forme primitive, il restituera le travail qu'il avait emmagasiné. Par exemple, écartons un ressort de sa position d'équilibre, il faudra pour cela développer une certaine force. Pendant tout le temps où le doigt poussera le ressort devant lui pour l'armer, il y aura dépense de travail que l'on peut évaluer en multipliant la valeur de la force par la valeur du chemin parcouru. Une fois arrivé à la limite de la course, laissons le ressort revenir lentement à la position d'équilibre primitive, que va-t-il se passer? Le ressort exercera sur notre doigt, dans chacune de ses positions, le même effort que pendant le premier temps de l'opération, il repoussera le doigt devant lui et, le chemin parcouru étant le même, il rendra le même travail que celui qui a été dépensé pour l'armer.

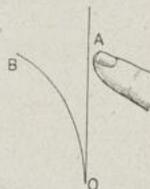


Fig. 40.

Il en résulte que, dans une première période, le doigt fournit du travail au ressort, dans la seconde période le ressort rend le travail en repoussant le doigt jusqu'à la position de départ. On dit qu'au moment où le ressort était armé, il renfermait à l'état potentiel le travail qu'il a pu dépenser dans la suite.

Toute la mécanique des corps élastiques se trouve dans ces trois phases. On démontre que, si le corps était idéalement élastique, il n'y aurait aucune perte dans ces transformations successives, le travail rendu serait absolument égal au travail absorbé; si, au contraire, il subsiste des déformations permanentes, il y a toujours perte de travail. C'est ce dont il est facile de se rendre compte.

Examinons d'abord le cas d'un corps qui serait parfaitement élastique; dans la pratique un ressort bien trempé remplit ce but d'une façon suffisante. Avec le doigt nous allons le faire passer lentement de la position A à la position B (fig. 40), puis nous le laisserons revenir également très lentement de B en A en modérant à chaque instant sa vitesse avec le doigt. Sans entrer dans l'analyse détaillée de ce qui se passe, il est facile de comprendre que ces deux opérations sont exactement inverses. Dans chaque

position du ressort, la force qui s'exerce, entre le doigt et lui, est la même, quel que soit le sens du déplacement; les chemins parcourus dans les deux cas sont aussi les mêmes; donc le travail fourni par le doigt animant le ressort est le même que celui qui est rendu par le ressort repoussant le doigt.

Si nous avons affaire à un corps complètement mou, il faudrait dépenser un certain travail pour le déformer de la position A à la position B, le corps n'ayant aucune tendance à revenir de B en A ne rendrait aucun travail : tout le travail dépensé serait perdu.

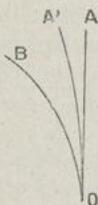


Fig. 41.

Mais supposons un corps ayant des propriétés intermédiaires, n'étant ni absolument élastique, ni complètement mou, que va-t-il se passer? Nous savons qu'après la fin de l'expérience il doit rester une déformation permanente, par exemple une lame que l'on a fait passer de la position A à la position B ne reviendra qu'en A'. L'écart entre A et A' sera la déformation permanente (fig. 41). Le travail nécessaire pour faire

passer le ressort de la position A à la position B est évidemment supérieur à celui qui sera rendu par ce même ressort passant de la position B à la position A'.

Nous voyons donc qu'il y a une perte de travail chaque fois qu'il se produit une déformation permanente : cela peut arriver quand les corps sont plus ou moins mous, mais cela se produit aussi quand ils sont trop rigides, car alors pour la moindre flexion il y a rupture. Il en résulte que dans tout dispositif mécanique susceptible de recevoir des chocs, il faut que ces chocs se produisent entre pièces élastiques, sous peine de déformations permanentes ou de ruptures, et par suite d'usure rapide et de détérioration; de là l'utilité des ressorts. Il n'y a pas lieu d'insister sur l'avantage de l'élasticité au point de vue de la conservation des corps, ce que nous venons de dire et l'observation journalière font comprendre assez clairement qu'il n'y a que les corps possédant un certain degré d'élasticité qui soient de conservation facile, les corps mous se déforment, les corps rigides se brisent. C'est là un principe dont on ne saurait exagérer la portée et dont il faut bien se pénétrer : « *L'élasticité est la sauvegarde des corps solides.* »

L'élasticité des corps joue aussi un rôle capital dans l'épargne du travail, quoique la compréhension de ce fait résulte des

expli-
rappor-
bien sa-
aux piè-
produi-

Qua-
l'aide
soit ab-
marche
et il e-

déjà ét-
Mar-
dynam-
sur le
vant à
le sol,
obteni-

ment,
variait
nature
le lien

conven-
liser u-
p. 100
absolu

Mar-
donne
balanc-
de tou-
ainsi s-

suspen-
fléau
poids
En l'é-
résulta-
choc
poids
Si, au
fil de
naison

explications que nous avons données, il nous semble utile de rapporter deux expériences très ingénieuses de Marey, qui font bien saisir l'avantage qu'il y a de substituer des pièces élastiques aux pièces rigides, dans les dispositifs expérimentaux où il peut se produire des chocs.

Quand un homme ou un animal traîne un corps sur le sol à l'aide d'un lien, il est rare que la traction exercée sur ce lien soit absolument continue. Généralement les mouvements de la marche entraînent une série de secousses plus ou moins rythmées et il en résulte des chocs sur les points d'attache, ainsi qu'il a déjà été dit plus haut.

Marey, en interposant un dynamomètre enregistreur sur le trajet du lien servant à traîner un corps sur le sol, constata que, pour obtenir le même déplacement, le travail dépensé variait beaucoup suivant la nature de ce lien. Lorsque le lien avait une élasticité convenable, on pouvait réaliser une économie de 26 p. 100 sur le cas où il était absolument rigide.

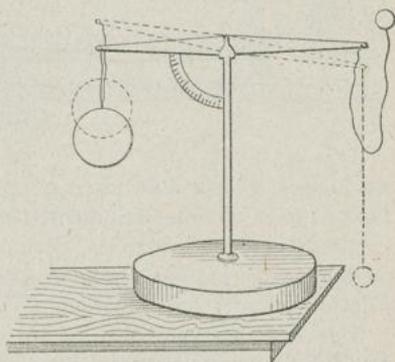


Fig. 42.

Marey a ensuite montré expérimentalement que chaque choc donne lieu à une perte. Il s'est servi pour cela d'une petite balance dont le fléau, grâce à un encliquetage, n'était susceptible de tourner que dans un sens déterminé fig. 42. Ce fléau pouvait ainsi supporter, sans s'incliner, un poids de 50 g. par exemple, suspendu à une de ses extrémités. A l'autre extrémité du même fléau était attaché un fil assez long portant un poids de 10 g. Ce poids ne pouvait par sa seule pesanteur faire incliner le fléau. En l'élevant à une certaine hauteur et le laissant retomber il en résultait un choc à chaque chute. L'expérience prouve que ce choc a beau se répéter, le fléau n'est pas entraîné tant que le poids de 50 g. est suspendu par l'intermédiaire d'un lien rigide. Si, au contraire, le soutien se fait par un ressort à boudin ou un fil de caoutchouc, on voit à chaque chute du petit poids l'inclinaison du fléau augmenter; en même temps l'on constate la dis-

parition des chocs qui, dans le premier cas, ébranlaient tout l'appareil.

Voici maintenant une expérience d'hydraulique d'une grande portée dans l'étude de la circulation.

On prend un flacon de Mariotte dont l'eau s'écoule à travers deux tubes reliés au flacon par une branche commune, comme le représente la figure 43.

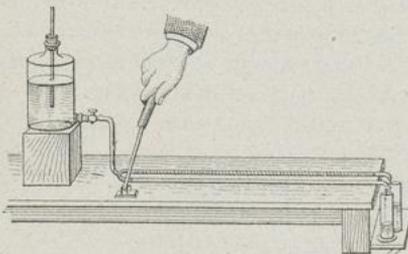


Fig. 43.

L'un de ces tubes est à parois rigides, l'autre est un tube de caoutchouc à parois élastiques. Si l'écoulement est continu, on peut régler l'orifice des deux tubes de façon à ce qu'ils aient le même

débit. Ce réglage fait, produisons, à l'aide d'un levier qui permet d'écraser l'origine des tubes une série d'interruptions dans les deux courants, il en résultera des jets saccadés. Mais ces oscillations seront bien moindres dans le tube élastique que dans le tube rigide, et le débit du premier sera supérieur à celui du second.

Il est aisé de comprendre ce qui se passe. Dans le tube rigide, pendant l'interruption du courant, le liquide est immobile; au moment où l'on soulève le levier, le liquide du vase doit, pour s'écouler mettre en mouvement toute la colonne qui se trouve devant lui dans le tube, il en résulte un véritable choc. Dans le tube élastique, au moment où le liquide du vase se précipite pour s'écouler, la paroi du tube se distend, le volume de ce tube augmente pour recevoir le liquide qui lui arrive brusquement. Pendant l'interruption, le courant est fatalement complètement coupé dans le tube rigide; mais dans l'autre, les parois revenant sur elles-mêmes, pressent sur le liquide pour faire continuer l'écoulement par l'orifice, jusqu'au moment où sous un nouveau flot elles se dilateront pour recevoir un nouveau volume venant du vase.

Cette explication fait comprendre le fonctionnement du ballon interposé sur le trajet de la soufflerie de Richardson adaptée aux pulvérisateurs ou au thermocautère.

Ces expériences et un grand nombre d'autres observations montrent le rôle important que joue l'élasticité des corps, tant

au poi
travail,
de prod
L'étu
importa
au pren
breuses
travaux
traités
Leur p
de renv
besoin
compre
l'élastic

R
Nou
subir d
rieures
primiti
nente.
mation
Il p
flexion
ces pro
Qua
ne dé
certain
section
rable,
que l'
résista
corps.
Voi

au point de vue de leur bonne conservation que de l'épargne du travail, dans les cas où des forces intermittentes sont susceptibles de produire des chocs.

L'étude de l'élasticité des corps prend donc une place très importante dans les applications de la mécanique. Divers auteurs, au premier rang desquels il faut citer Wertheim, ont fait de nombreuses recherches sur ce sujet. Les résultats numériques de ces travaux se trouvent, avec une grande profusion de détails, dans les traités de résistance des matériaux ou dans des tables spéciales. Leur peu d'intérêt pour les applications biologiques nous permet de renvoyer à ces ouvrages dans le cas exceptionnel où l'on aurait besoin d'un de ces résultats. L'essentiel ici est de bien faire comprendre, d'une façon générale, le rôle important que joue l'élasticité des corps dans les actions mécaniques.

IV

RÉSISTANCE DES SOLIDES A LA RUPTURE

Nous avons vu que les solides parfaitement élastiques peuvent subir des déformations considérables sous l'action des forces extérieures, et après disparition de ces forces revenir à leur forme primitive. Les corps mous restent déformés d'une façon permanente. D'autres corps enfin, quand on dépasse une certaine déformation ou un certain effort, cassent.

Il peut y avoir rupture par traction, par compression, par flexion, par torsion, par cisaillement, ou enfin par plusieurs de ces procédés combinés entre eux.

Quand on étire un corps cylindrique, la résistance à la rupture ne dépend que de la section transversale du corps et d'un certain coefficient variable avec la nature du corps. Plus la section transversale est grande, plus la résistance est considérable, ces deux quantités varient proportionnellement, et, ce que l'on appelle le *coefficient de résistance du corps* est la résistance par centimètre carré ou par millimètre carré de ce corps.

Voici à titre d'indication les chiffres moyens trouvés par Wert-

heim, comme donnant, en kilogrammes, la résistance par millimètre carré à la rupture par traction, pour divers tissus de l'organisme.

Muscles.	0,038
Artères.	0,14
Veines.	0,18
Nerfs.	1,35
Tendons.	6,25
Os.	7,99

Ces chiffres approximatifs varient considérablement avec l'état des tissus, en particulier avec la dessiccation et la température.

Si, au lieu d'étirer un solide, un prisme par exemple, on le comprime dans la direction de son axe, il arrive aussi un moment où la rupture se fait. La résistance dans ce cas est encore proportionnelle à la surface de section. Pour les tissus de l'organisme, l'expérience ne peut guère se faire que pour les os; nous donnerons plus loin les chiffres pouvant avoir quelque intérêt, mais il y a un point très important qu'il ne faut pas perdre de vue. La résistance

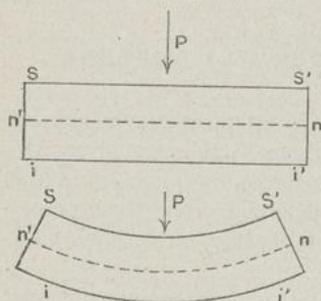


Fig. 44.

d'un prisme par compression ne dépend que de sa section transversale à la condition qu'il n'intervienne pas de flexion. Il arrive souvent, quand on comprime une tige trop longue par rapport à sa section transversale, qu'il se produise tout à coup une flexion; il n'y a plus alors un simple écrasement.

C'est pourquoi, dans toutes les pièces qui doivent résister à une

compression, il faut prendre des précautions contre la possibilité d'une flexion, soit en évitant les pièces trop longues, soit en les maintenant, sur divers points de leurs parcours, contre les déplacements latéraux; soit enfin en leur donnant une forme de section convenable.

Cette forme convenable est celle de toute pièce devant résister à la flexion. Considérons une pièce allongée, prismatique par exemple (fig. 44), reposant par ses extrémités sur des appuis et supportant sur son milieu un poids P. Cette pièce va fléchir, chacune de ses fibres formant une courbe à concavité supérieure. Dans

cette ne
La fibre
interme
Cette fi
tion ni
à nn' r
seront
seront
sont plu
ne peu
rompre
 nn' et
conçoit
parties
ces poi
C'est po
sur son
donne t
On a é
forman
tion, c'
c'est la
matière
Quan
tions, il
que pr
donner
neutre
la mêm
on aura
tube, p
la surf
voisine
flexion
compre
Dans
d'analog
nous p
partie s
différen

cette nouvelle forme la fibre inférieure ii' , se trouvera allongée. La fibre supérieure ss' se trouvera raccourcie, et une certaine fibre intermédiaire nn' aura la même longueur qu'à l'état de repos. Cette fibre nn' , dite fibre neutre, n'aura subi ni un effort de traction ni de compression, la fibre ii' , et toutes les fibres inférieures à nn' résisteront à la rupture par traction d'autant plus qu'elles seront plus éloignées de nn' . Les fibres placées au-dessus de nn' seront au contraire d'autant plus comprimées qu'elles sont plus éloignées de nn' . Il arrive un moment où ii' ne peut s'allonger ou ss' plus se raccourcir sans se rompre; la rupture commence par un point éloigné de nn' et se propage alors à travers tout le prisme. On conçoit qu'il faille autant que possible soulager les parties les plus éloignées de nn' , c'est-à-dire porter en ces points la plus grande partie de la matière dont on dispose. C'est pour cela qu'une pièce prismatique devant supporter un poids sur son parcours entre deux supports, on lui donne une forme analogue à celle de la figure 45.

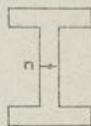


Fig. 45.

On a éloigné la matière de la fibre neutre en formant deux semelles : l'une travaillant à la traction, c'est l'inférieure, l'autre à la compression, c'est la supérieure. On a employé le moins de matière possible pour réunir ces deux semelles.

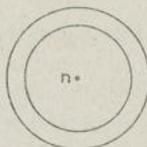


Fig. 46.

Quand une pièce doit résister à la flexion dans diverses directions, il faut dans toutes les directions réaliser la même condition que précédemment. Cela conduit évidemment à donner à la pièce la forme d'un tube creux, la fibre neutre se trouvant alors au centre. En employant la même quantité de matière pour faire une tige on aurait la même résistance à la traction que le tube, puisque cette résistance ne dépend que de la surface de section; mais la matière serait très voisine de la fibre neutre. Une pareille tige résiste mal à la flexion et, par suite de ce que nous avons dit plus haut, à la compression.

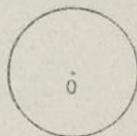


Fig. 47.

Dans la résistance à la torsion nous allons trouver quelque chose d'analogue. Considérons une pile de pièces de monnaie; quand nous prenons d'un côté, à pleines mains, la partie inférieure et la partie supérieure de l'autre, et que nous exerçons une torsion, les différentes pièces de monnaie tournent les unes sur les autres en

frottant. Si nous faisons la même opération sur une tringle cylindrique, les diverses tranches de la tringle tendront à tourner les unes sur les autres comme les précédentes. Considérons une de ces tranches vue de face, retenue à la tranche suivante par la cohésion de la matière, il est évident que le déplacement maximum tendant à se faire aux points éloignés du centre O, l'effort de rupture est d'autant plus grand que l'on s'éloigne plus de O. Il faut donc porter le plus possible de la matière disponible loin de O, celle qui, se trouve près de O, ne subissant pour ainsi dire pas

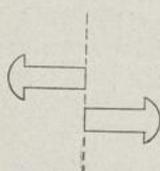


Fig. 48.

d'effort et ne contribuant pas à la résistance de la pièce à la torsion. On voit qu'on arrive encore à la forme en tube, et la résistance sera d'autant plus grande que le diamètre du tube sera plus considérable.

Enfin nous avons à considérer le cisaillement.

Ce genre de rupture se produit quand deux tranches d'une pièce tendent à glisser l'une sur l'autre, toute la partie supérieure de la pièce cherchant à se déplacer sur la partie inférieure. Le type de la pièce travaillant au cisaillement est le rivet des ciseaux, il tend à se rompre comme l'indique la figure 48. Chaque partie de la surface de rupture se comporte de la même façon; la résistance au cisaillement est proportionnelle à cette surface.

Il est impossible de prévoir toutes les combinaisons résultant des différentes espèces de ruptures, dans chaque cas il faudra en faire une étude particulière et donner à la pièce une forme appropriée. Cependant, souvent, suivant l'usage auquel on destine la pièce, il y a un genre de rupture prédominant et c'est d'après lui que l'on se guidera.

V

OS

Comme on sait, on classe les os, aussi bien ceux des hommes que des animaux, en :

- a. Os longs;
- b. Os larges et plats;
- c. Os courts et irréguliers.

Les premiers se trouvent dans les membres, ils se composent d'une partie allongée, cylindrique ou prismatique triangulaire, nommée la diaphyse, terminée à ses extrémités par les épiphyses. Cette forme s'explique aisément, la partie moyenne de l'os a un calibre réduit parce qu'elle est entourée par la masse musculaire des membres à laquelle il faut une grande place; dans ces conditions, du reste, la diaphyse a encore une très grande résistance, plus que suffisante pour supporter les efforts sollicités par la contraction des muscles. Aux extrémités de l'os les épiphyses peuvent se développer, car à leur niveau les muscles ont presque complètement fait place aux tendons de dimensions beaucoup plus réduites. Ce développement des épiphyses est avantageux, c'est par elles que les os s'articulent avec les os voisins. Il y a intérêt à ce que cette jonction se fasse par des surfaces étendues, il y a là une bonne condition de solidité et de résistance aux chocs qui peuvent se transmettre à travers les articulations. De plus, l'action mécanique des muscles est aussi favorisée de ce chef au commencement de la flexion d'un os sur le voisin ou à la fin de l'extension, comme nous le verrons à propos des articulations.

Les os plats et larges sont généralement convexes d'un côté et concaves de l'autre, ils servent en effet de paroi à certaines cavités, comme les os du crâne ou ceux du bassin, ou bien sont, comme l'omoplate, obligés de se mouler sur une surface convexe. Ce dernier os est très mince et pourrait de ce fait subir facilement des flexions, aussi est-il avantageusement renforcé par une crête osseuse formée par un plan perpendiculaire au plan principal de l'os et nommée épine de l'omoplate.

Les bords des os plats, qui seraient très fragiles s'ils étaient minces, sont plus ou moins épaissis, formant ainsi un bourrelet sur lequel les muscles peuvent prendre une insertion solide. Quant aux os courts, ils ont les formes les plus diverses. Ils se trouvent généralement là où les mouvements sont très variés, par exemple au carpe, au tarse, dans la colonne vertébrale. Ils portent souvent chacun plusieurs surfaces articulaires et de nombreuses bosses, dépressions ou rugosités donnant une bonne insertion aux tendons qui se terminent sur eux.

Quelle que soit la variété d'os que nous examinons, nous les trouvons composés de deux substances au premier abord très différentes, la substance compacte et la substance spongieuse. Coupons un os long en travers par le milieu de la diaphyse, nous

constatons que cette diaphyse est très dure, difficile à rompre, d'un tissu serré sans vides dans son épaisseur, c'est la substance compacte. Faisons maintenant une opération analogue sur une des épiphyses de ce même os, nous trouverons aussi de la substance compacte, mais elle ne formera qu'une écorce mince, au-dessous de laquelle apparaîtra un tissu composé de travées osseuses, entourant des lacunes plus ou moins importantes, et ayant parfois une assez grande analogie d'apparence avec certaines pierres ponceuses; c'est le tissu spongieux. Les os courts sont constitués comme les épiphyses.

Quant aux os plats, ils comprennent deux lames de tissu compact adossées et séparées par une couche de tissu spongieux.

L'os est un des tissus les plus denses de l'économie, il ne le cède à ce point de vue qu'aux dents. Cette densité a été déterminée par divers auteurs.

Wertheim, qui s'est beaucoup occupé de ce genre de questions, a trouvé 1,934, Rauber 1,877, Aeby 1,936. En prenant pratiquement le chiffre 2, facile à retenir, on ne commettra pas d'erreur appréciable. Cette densité se rapporte à un fragment découpé dans la portion compacte d'un os long; il faut bien remarquer qu'en opérant sur un os entier ou sur du tissu spongieux, on est exposé à de grosses erreurs. Les pièces sur lesquelles on opérerait ainsi, contiennent en effet des cavités dans lesquelles l'eau ne pénètre qu'incomplètement, ce qui fausse complètement les mesures.

Les deux propriétés physiques les plus importantes du tissu osseux sont son élasticité et sa résistance à la rupture.

Sous l'influence de forces extérieures, l'os peut se déformer et reprendre ensuite sa force primitive. Ces déformations possibles sont généralement faibles. Elles ont une très grande importance, car on sait que les corps sont d'autant plus susceptibles de se rompre sous l'influence d'un choc qu'ils sont moins déformables, malgré leur ténacité. Je ne citerai qu'en passant la propriété que l'on rencontre parfois sur les os de sujets très jeunes, de pouvoir subir une déformation permanente très considérable, sans rupture apparente, c'est ce que l'on nomme les fractures en bois vert.

Les chiffres donnés par les divers auteurs relativement à l'élasticité des os sont assez concordants. D'après Wertheim, le coefficient d'élasticité des os frais serait de 1 819 à 2 749 kg. par

millim
sensib
du co
des no
que le
d'élast
savin
faire a
résista
Ces
nant.
dessicc
tance.
Rauber
humain

On v
tance a
cient d
tance a
Rauber
carré s

Le m
gieux,
que, s
forces.
donner
observ
gieuse,
Rauber
8,96 kg

La s
bois de
elle est
Dans c
de ne
pièces

millimètre carré; d'après Rauber, 1 871 à 2 560 kg., cela revient sensiblement au même. Ces chiffres se rapportent à la température du corps humain; au-dessous de cette température, on trouve des nombres plus forts; la dessiccation agit dans le même sens que le froid, mais d'une manière plus énergique. Le coefficient d'élasticité des os est à peu près le double de celui du bois de sapin étiré dans la direction des fibres. Je rappelle qu'il ne faut faire aucun rapprochement entre le coefficient d'élasticité et la résistance à la rupture par traction, par exemple.

C'est cette seconde propriété que nous allons examiner maintenant. Ici encore nous voyons l'abaissement de température et la dessiccation produire une augmentation des coefficients de résistance. Ce fait déjà signalé par Wertheim a aussi été observé par Rauber. Sur la diaphyse des os frais à la température du corps humain, Rauber a trouvé, pour la résistance à la rupture par traction :

Adulte	9 kg. 25 à 12 kg. 41	par mm. carré.
Vieillard	6 kg. 37 à 7 kg. 75	—

On voit ici se produire une diminution importante de la résistance avec l'âge; ce phénomène n'a pas été observé pour le coefficient d'élasticité. Il ne semble pas non plus exister pour la résistance à la compression; dans ce cas les chiffres trouvés par Rauber sont compris entre 12 kg. 56 et 16 kg. 8 par millimètre carré sans influence bien marquée pour l'âge.

Le même auteur a fait quelques expériences sur le tissu spongieux, mais elles ont beaucoup moins d'intérêt, car on conçoit que, suivant l'importance des cavités et suivant la direction des forces, on trouve des résultats extrêmement variables. Pour donner une simple idée de la diminution de résistance que l'on observe en passant de la substance compacte à la substance spongieuse, je dirai que, pour cette dernière, les chiffres trouvés par Rauber sur des vertèbres et la tête du fémur sont de 0,84 à 8,96 kg. par millimètre carré.

La substance compacte de l'os résiste à la rupture comme le bois de sapin soumis à la traction dans le sens des fibres, mais elle est deux fois plus résistante si l'on opère par compression. Dans ce cas je rappellerai une recommandation importante; c'est de ne pas oublier l'influence considérable de la longueur des pièces d'épreuve sur la rupture par compression. Voici du reste

un exemple tiré de Rauber. Un cube de 3 millimètres de côté découpé dans la substance compacte d'un fémur s'écrasa sous une charge de 150 kg., alors qu'un prisme de même section, mais ayant 45 millimètres de hauteur, ne put supporter sans se rompre plus de 108 kg. Il est bon, pour avoir des résultats concordants, de ne jamais prendre de blocs d'épreuve dont la dimension verticale soit supérieure à trois fois la dimension horizontale.

Ce phénomène, on le sait, ne se produit pas pour la traction, où la résistance ne dépend que de la section.

Les déterminations du coefficient d'élasticité et du coefficient de résistance ne nous permettent pas de déterminer la limite de rupture pour un os entier, un fémur ou un crâne par exemple, un pareil problème conduirait à des calculs inextricables.

Messerer s'est proposé de combler cette lacune et a fait un grand nombre d'expériences de rupture des divers os du corps humain dans différentes conditions, en choisissant toujours des sujets ayant succombé à la suite de courtes maladies. Il se servit pour cela de machines destinées aux essais industriels, et, ne pouvant opérer à la température du corps humain, il évita tout au moins la dessiccation et se maintint entre 20° et 25°.

Voici les principaux résultats auxquels il arriva. Prenons d'abord le crâne. Lors de la compression, il commence par se produire une diminution de longueur du diamètre correspondant à la compression, en même temps il y a une légère augmentation de dimension des autres diamètres, puis il se produit une fracture de la base du crâne par une ligne sinueuse suivant la direction de la compression, si l'on agit suivant le diamètre antéro-postérieur ou transverse. Si l'on agit, au contraire, dans le sens vertical par l'intermédiaire des vertèbres voisines, il y a un enfoncement de la base avec fracture d'un ou des deux rochers.

Dans la compression latérale on observa comme plus grande variation une diminution de 8 mm. 8 avec une augmentation dans le sens sagittal de 0 mm. 54 et dans le sens vertical de 0 mm. 6.

Dans la compression sagittale il y eut une diminution de 5 mm. 4 dans cette direction, avec une augmentation de 0 mm. 36 verticalement et de 0 mm. 7 dans le diamètre transversal.

Dans le premier cas la rupture se fit à 520 kg., dans le second à 650 kg., et lors de la compression verticale à 270 kg., sans variation des autres diamètres.

Dans les cas de compression avec un objet moussé, il se produit

des enfoncements très localisés. et les efforts nécessaires pour cela ne sont nullement proportionnels à l'épaisseur des os, par suite de la présence du diploé.

Le maxillaire inférieur, dans la compression latérale, se rompt près du menton, pour 60 kg., après un rapprochement des branches d'environ 10 millimètres près des condyles.

Lorsque la pression se produit d'avant en arrière sur le menton, les deux branches s'écartent au contraire d'environ 13 millimètres, puis la rupture se fait au voisinage des condyles pour une charge de 190 kg.

La résistance des vertèbres va en augmentant de haut en bas et est extrêmement variable d'une personne à l'autre : 22-93 kg. par centimètre carré. Elle diminue avec l'âge.

Les côtes sont extrêmement déformables, sur un sujet on put amener le sternum contre la colonne vertébrale sans provoquer de fracture.

Pour le bassin une compression moyenne de 250 kg. d'avant en arrière produit en général une rupture des deux pubis.

La compression latérale sur la crête iliaque avec 180 kg. ouvre une symphise sacro-iliaque.

Enfin une compression transversale de 290 kg. donne lieu à une rupture verticale des parties antérieures et du sacrum.

Les os longs ne se rompirent que pour des efforts beaucoup plus considérables, et je ne donnerai que quelques exemples.

Rupture à la traction de l'humérus (femme).	800 kg.
— — du fémur (femme) . . .	1 350 —
Compression de l'humérus (femme)	600 —
— diaphyse du fémur (femme)	750 —
Col du fémur (femme)	506 —

En soutenant les os sur deux appuis aux $\frac{2}{3}$ de la longueur et les chargeant au milieu, la rupture se produit pour des nombres de kilogrammes très variables ; ainsi nous avons :

Humérus	174-276 kg.
Fémur	263-400 —

Il faut d'ailleurs remarquer qu'un même os résiste très différemment suivant la manière dont il est placé sur les appuis ; ainsi, un tibia placé de façon à présenter sa crête en haut, résista à 326 kg., un autre identique, comprimé latéralement, se rompit à 226 kg. Dans ce genre de rupture il y a très souvent une double

fracture un fragment en coin, à base dirigée du côté de la compression, se détachant au point où cette compression s'exerce; quelquefois une des fissures se prolonge dans le corps de l'os jusque vers une épiphyse.

Si un os long, au lieu d'être placé sur deux appuis, est posé sur un plan résistant, la compression produit un écrasement de la diaphyse avec fentes et fissures se prolongeant très loin, mais il faut pour cela des actions énormes.

Enfin, dans les cas de torsion, il se produit une fracture en spirale. Cette spirale suit le sens de la torsion, c'est-à-dire qu'en tournant le côté mobile de l'os de gauche à droite, comme si l'on voulait enfoncer une vis dans le bois, on fait un trait de fracture ayant la direction du filet de vis, mais beaucoup plus allongée.

Il faut pour cela une force qui, agissant au bout d'un bras de levier de 46 centimètres, serait :

Pour l'humérus de	40 kg.
— le radius	12 —
— le cubitus	8 —
— le fémur	89 —
— le tibia	48 —
— le péroné	6 —

Pour terminer il y a lieu de faire remarquer que les os sont construits de façon à avoir le maximum de résistance pour le minimum de substance employée. Ceci se comprend facilement pour la diaphyse des os longs; nous avons vu, en effet, qu'à poids égal un tube creux résiste toujours mieux à la flexion qu'une tige pleine de même nature, et c'est la rupture par flexion qui est toujours le plus à craindre dans les corps de forme allongée. Pendant longtemps on avait cru que la substance spongieuse avait une disposition quelconque, mais Hermann Meyer fit voir que, si elle affectait une forme différente dans chaque os, ses travées étaient toujours semblables dans un os déterminé, en passant d'un individu à l'autre. Il attira surtout l'attention sur la régularité de ces travées dans la tête du fémur. Le mathématicien Culmann, assistant par hasard à cette démonstration, reconnut et démontra que les lamelles osseuses de la partie supérieure du fémur étaient orientées suivant des directions que le calcul faisait prévoir, pour donner à l'os son maximum de résistance sous le moindre poids. Depuis cette époque, divers travaux, ceux de Wolf entre autres, apportèrent une confirmation éclatante à la théorie de Culmann.

VI

ARCHITECTURE DES MUSCLES

Un muscle se compose de fibres musculaires juxtaposées, insérées à leurs deux extrémités, et dont le raccourcissement produit la variation de forme du muscle. Les muscles de l'homme et des animaux offrent les aspects les plus variés; ils ont aussi à remplir des fonctions très différentes. C'est ainsi que nous voyons les muscles fessiers du cheval destinés à développer des efforts très considérables et avoir une masse énorme, tandis que d'autres muscles de la face de l'homme n'ont à produire aucune force et sont de dimensions extrêmement réduites. Certains muscles sont longs et minces, comme le couturier; d'autres gros et courts, comme le deltoïde ou les fessiers. Les uns sont à fibres parallèles, comme le biceps; d'autres vont en éventail, comme le trapèze ou le temporal.

Au moment où un muscle se contracte, ses différentes fibres agissent par leur élasticité et se comportent d'une façon analogue à des fils de caoutchouc qui seraient allongés et tendraient à revenir à leur position d'équilibre.

Chacune d'elles tire donc sur son point d'attache avec une force exprimée par la formule donnée à propos de l'allongement élastique d'une tige.

$$F = ES \frac{l}{L}$$

L étant la longueur qu'aurait la fibre contractée raccourcie, l la quantité dont elle est allongée par suite de la fixité de ses attaches, S la section de chaque fibre, F la force exercée par elle, et par suite aussi la traction exercée sur elle. E est le coefficient d'élasticité de la fibre musculaire.

Nous allons tirer une première conclusion de cette formule. Si nous considérons des fibres musculaires ayant même section S et même coefficient d'élasticité E , pour que ces fibres prennent la même part à la force développée par le muscle dans la constitution duquel elles entrent, elles devront produire la même force F ; par conséquent, pour toutes $\frac{l}{L}$ devra avoir la même valeur, c'est-

à-dire que le déplacement de leur extrémité motrice devra toujours être une même fraction de leur longueur.

Il s'ensuit que lorsqu'une fibre musculaire produira un grand déplacement, il faudra qu'elle soit longue; si elle n'a à produire qu'un faible déplacement, pour produire tout son effet elle devra être courte.

Considérons maintenant un muscle dans son ensemble. Si $\frac{l}{L}$ a la même valeur pour tous les muscles, E étant sensiblement constant, la formule fait voir que S devra être d'autant plus considérable que F sera plus grand, c'est-à-dire qu'il faut un muscle d'autant plus gros qu'il devra développer un effort plus considérable.

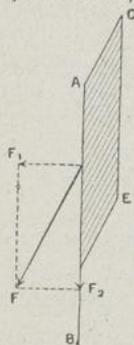


Fig. 49.

Borelli avait déjà constaté la loi des longueurs et fait remarquer qu'un muscle peut soulever un poids à une hauteur d'autant plus considérable qu'il a des fibres plus longues.

Si nous cherchons à vérifier ces lois sur l'homme, nous constatons que lorsqu'un muscle a à opérer un grand déplacement, il est composé de fibres longues; le couturier en est un des meilleurs exemples. Au contraire, dans les muscles à faible excursion, tels que les fléchisseurs des doigts, le jambier antérieur, le long péronier latéral et bien d'autres,

les fibres doivent être courtes. Ces muscles, s'insérant à grande distance de l'os mobile sur lequel ils doivent agir, sont alors pourvus de tendons très longs. De plus, ces muscles ont également à développer des efforts assez considérables; ils devraient donc avoir une grande section transversale. Mais la place faisant défaut pour loger un muscle trop épais, c'est à l'aide d'un artifice qu'un grand nombre de fibres peuvent se ranger les unes à côté des autres et concourir à un effort commun. Les fibres musculaires s'insèrent à la partie supérieure, sur une longueur assez considérable



Fig. 50.

CE, à un os fixe ou à une aponévrose tendineuse (fig. 49). Puis ces fibres vont se jeter obliquement et sensiblement parallèlement entre elles sur un tendon AB, lequel se termine sur l'os mobile en B.

Si chaque fibre, dans sa contraction, produit une force f et qu'il y ait n fibres, la force totale exercée par l'ensemble des fibres est $F = nf$. Cette force n'est pas dirigée dans le sens du

tendon; mais nous savons qu'elle peut se décomposer en deux autres, une force F_1 normale à la direction du tendon et qui, par conséquent, n'aura aucun effet sur l'articulation, et une force F_2 à laquelle se réduira toute l'action utile du muscle.

Les fibres musculaires peuvent d'ailleurs s'insérer des deux côtés du tendon AB, ou d'un côté seulement.

Suivant le cas, on a alors un muscle penniforme et semi-penniforme. Bien des muscles de l'organisme ne sont penniformes qu'en apparence, c'est-à-dire que de courtes fibres musculaires sont terminées de chaque côté



Fig. 51.

par un petit tendon et placées l'une à côté de l'autre sensiblement comme les fibres des muscles penniformes vrais; toutefois ce qui différencie les premiers des derniers c'est que leur traction ne se fait pas obliquement sur le tendon inférieur, mais bien dans sa direction, ils ont pour cela un effet plus efficace. Ils mériteraient donc le nom de muscles pseudo-penniformes.

Dans le cas où les deux os à mouvoir l'un par rapport à l'autre sont voisins et où l'espace latéral ne manque pas, les fibres vont directement d'un os à l'autre, comme le représente la figure 51. C'est, par exemple, ce qui se présente pour le masséter destiné à élever la mâchoire inférieure. Cependant, ce muscle, qui a besoin d'une grande puissance, mais dont les excursions sont limitées, n'a pas encore toute la dimension transversale qui lui est



Fig. 52.

nécessaire; par contre, par suite du faible raccourcissement que subissent ses fibres lors des mouvements de la mâchoire, il gagnerait à être réduit en longueur. Un nouvel artifice est alors mis en œuvre. Chaque fibre musculaire n'a que le tiers environ de la longueur totale qui sépare les deux points d'insertion: ces fibres sont groupées en petits ventres prolongés par un tendon. Les petits muscles ainsi constitués sont juxtaposés, mais leurs ventres musculaires ne se correspondent pas à la même hauteur. Pour ne pas donner trop d'épaisseur au muscle total, ils se disposent à peu près comme l'indique la figure 52. Il en résulte qu'en réalité le muscle masséter a une longueur de fibres musculaires trois fois moindre que leur longueur apparente et une section efficace trois fois plus considérable.

Un autre muscle de l'économie présente cette même disposition dans de plus grandes proportions. C'est l'ischiococcygien. Le

coccyx n'ayant qu'une mobilité insignifiante, la longueur des fibres de ce muscle doit se réduire beaucoup; aussi offre-t-il la même structure que le masséter, mais chaque petit ventre musculaire ne dépasse pas les dimensions d'un grain de blé, d'après ce que nous a dit M. le P^r Farabeuf.

Le grand pectoral nous offre aussi une disposition remarquable, ayant pour but de conserver à chacune des fibres qui le constituent un même allongement relatif. Ces fibres s'insèrent d'un côté à la clavicle et au sternum, de l'autre à l'humérus. Dans

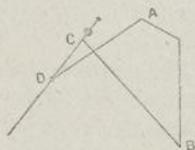


Fig. 53.

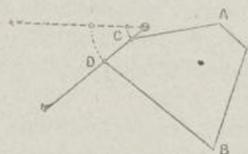


Fig. 54.

leur trajet, ces fibres se croisent, comme l'indique la figure 53. Il est aisé de voir que sans cette disposition (fig. 54), au moment des mouvements de l'humérus, les fibres AC ne subiraient qu'une variation de longueur insignifiante, tandis que les fibres inférieures seraient considérablement étirées. Ici encore, l'architecture du muscle est rationnelle.

En étudiant les muscles des divers animaux, nous trouvons à chaque pas des faits montrant la relation qui existe entre la structure de l'organe et sa fonction. C'est ainsi que nous voyons des muscles de la cuisse prendre un développement énorme chez les animaux sauteurs, chez le kangaroo par exemple. Chez les oiseaux, ce sont les muscles pectoraux, destinés au vol, qui attireront surtout notre attention, et il en ressortira un grand enseignement si nous comparons entre eux les muscles de diverses espèces. Certains oiseaux ont l'aile très grande, ils ne font que des battements de faible amplitude, par suite de la résistance considérable que l'air oppose à la surface de ces ailes. D'autres oiseaux ont des ailes petites et sont, pour pouvoir s'élever, obligés de faire des mouvements très étendus afin de compenser la petite surface sur laquelle ils prennent leur point d'appui. Dans la première catégorie rentrent les oiseaux de grand vol, l'aigle et la frégate; comme on peut le prévoir d'après ce que nous savons déjà, ces oiseaux ont des pectoraux courts mais très gros. Les seconds, comme le guillemot et le pingouin, ont des pectoraux

longs
mifères
fléchiss
interne
point d

Fig. 55.
et dro
reconn
long t
l'étend
du gen

très pr
de leu
fibres
Chez le
et à m
fibre n
puisqu

longs et grêles. Des faits analogues se retrouvent chez les mammifères, ils sont particulièrement démonstratifs sur les muscles fléchisseurs de la jambe sur la cuisse. Le biceps fémoral, le droit interne et le demi-tendineux ont chez les divers mammifères un point d'attache très variable. Chez l'homme, ces muscles s'insèrent



Fig. 55. — Muscles de la cuisse chez l'Homme. Les muscles *couturiers* (en haut) et *droit interne* (en bas) ont été fortement ombrés pour qu'on pût facilement les reconnaître. — Le droit interne est, à son extrémité inférieure, pourvu d'un long tendon; sa partie charnue est courte, ce qui est en harmonie avec l'étendue bornée du mouvement de ce muscle dont l'attache est très rapprochée du genou. — Muscle *couturier* pourvu d'un court tendon à son attache inférieure.

très près de l'articulation du genou; par conséquent l'amplitude de leur déplacement sera très petite et ces muscles auront des fibres musculaires courtes, prolongées par un tendon assez long. Chez les singes, ces mêmes muscles s'insèrent plus ou moins bas, et à mesure que l'on voit cette insertion s'éloigner du genou, la fibre musculaire augmente de longueur aux dépens du tendon, puisque l'excursion du point d'insertion inférieur devient de plus

en plus considérable. Chez les quadrupèdes, où le biceps s'insère sur presque toute la longueur du péroné, le tendon a complètement disparu.

Il serait important de comparer sur un même individu, sur l'homme en particulier, les divers muscles de l'organisme, et de vérifier que chacun d'eux a une longueur de fibre bien adaptée à sa fonction. Pour pouvoir faire cette étude d'une façon absolument

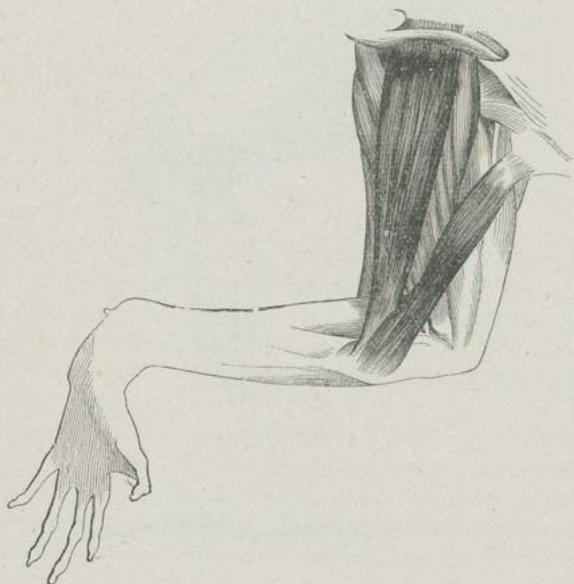


Fig. 56. — Muscle de la cuisse chez le Magot, muscle droit interne presque entièrement formé de fibres rouges; les attaches de ce muscle, assez éloignées du genou, lui donnent une grande étendue de mouvement comme fléchisseur de la jambe sur la cuisse. — Muscle conturier très peu pourvu de tendon.

rigoureuse, il faudrait que les divers muscles eussent tous même coefficient d'élasticité E et que chaque fibre ou chaque muscle de même section développât la même force F , or cela n'est pas vrai quand on passe d'un muscle à un autre. Mais il est permis de l'admettre pour les diverses fibres d'un même muscle; on peut alors chercher, si dans ce même muscle, toutes les fibres ont bien les unes par rapport aux autres la longueur qui leur convient le

mieux.
a été tr
W.
muscle
toutes
de lon
qu'elle
la lign

Fig. 57
genou
attac
ment
rouge

n'est
sinuo
fibres
toute
Un
égales
triang
d'un
ce m
les d

mieux. Cette étude a été faite par divers auteurs, et la vérification a été très satisfaisante.

W. Roux a fait des observations très intéressantes sur les muscles à fibres parallèles. Ces muscles doivent avoir des fibres toutes égales entre elles, car elles ont toutes les mêmes variations de longueur au moment de la contraction, et on peut admettre qu'elles ont la même constitution. Or, Roux a fait remarquer que la ligne qui sépare les fibres musculaires des fibres tendineuses

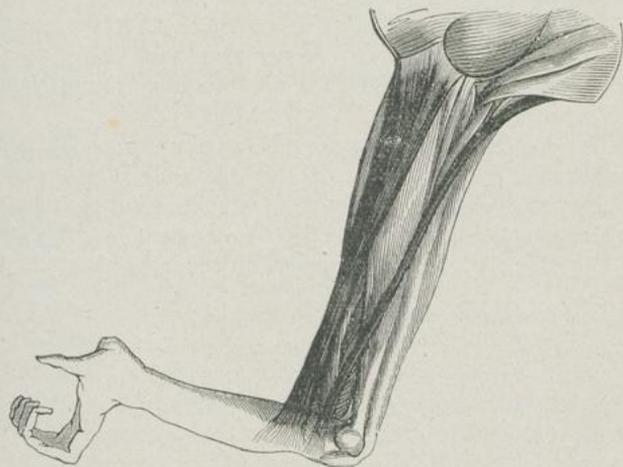


Fig. 57. — Muscle de la cuisse chez le Coariba. -- Droit interne s'insérant loin du genou, presque entièrement dépourvu de tendon. — Le contourier ayant son attache supérieure très éloignée de l'articulation coxo-fémorale, a des mouvements très étendus; il possède en conséquence une grande longueur de fibre rouge et pas de tendon.

n'est pas droite, mais présente une série de sinuosités, et que ces sinuosités se reproduisent si exactement aux deux extrémités des fibres musculaires, que ces fibres ont la même longueur dans toute la largeur du muscle (fig. 58).

Un muscle à fibres non parallèles ne doit plus avoir de fibres égales entre elles. Considérons un cas simple, celui d'un muscle triangulaire, c'est-à-dire d'un muscle dont toutes les fibres issues d'un même point C vont s'insérer sur une longueur AB. Lorsque ce muscle se contracte, le point C se déplace sur la ligne CD et les diverses fibres ne se raccourcissent plus de la même quantité.

C'est la fibre CD qui subit le plus grand raccourcissement, et les extrêmes CA et CB le moindre; donc, la fibre CD doit être la plus longue et les fibres extrêmes les plus courtes. En étudiant la

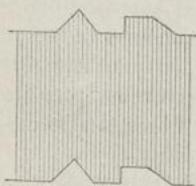


Fig. 58.

question avec soin, on trouve que la longueur des fibres musculaires doit être limitée par un cercle décrit sur DC comme diamètre; la partie extérieure du cercle et couverte de hachures doit être du tendon. Il est bien évident que si, comme cela arrive le plus souvent, il y a un tendon en C, il faut prolonger

d'autant chaque fibre musculaire du côté opposé. Ceci peut se vérifier par des mesures convenablement faites sur divers muscles.

Le brachial antérieur du singe offre aussi un exemple des plus démonstratifs de vérification. Ce muscle a des fibres presque parallèles entre elles, mais elles ne se raccourcissent pas toutes de la même quantité par la contraction. Au moment de la flexion du bras, les fibres AC, les plus éloignées du coude, subissent la plus

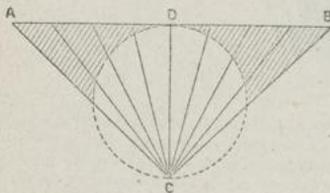


Fig. 59.

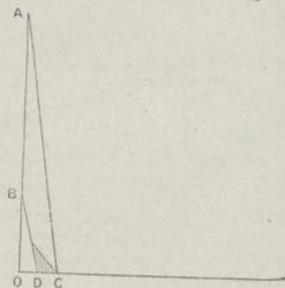


Fig. 60.

grande variation de longueur; les fibres les plus rapprochées, BD, ont la plus petite excursion. D'ailleurs les fibres AC sont les plus longues et AD les plus courtes; mais si l'on cherche quelle doit être la longueur relative exacte de ces diverses fibres pour les déplacements qu'elles ont, on trouve que les plus rapprochées seraient trop longues si elles prenaient tout l'espace BD. Aussi l'on voit apparaître une portion tendineuse, ombrée sur la figure, qui régularise le muscle.

Pour
pas tro
assez é
on voit
d'un ax
n'existe
Si d
étendu
surface
certain
pas glis
taine ét
Voye
façon r
Au p
plan, le
Suppl
metten
pourro
servant
fixe, l'
restant
Si u
articul
qui ser
sa cavi
autour
dans t
termin
sphère
Bien
formen
portion
celle co
ment p

VII

ARTICULATIONS

Pour que le contact de deux os s'articulant entre eux ne soit pas trop fragile, il faut que ce contact se fasse par des surfaces assez étendues. Dans les appareils fabriqués par main d'homme on voit parfois des rotations se faire autour d'une pointe ou autour d'un axe, mais cela nécessite l'emploi de matériaux très durs qui n'existent pas dans le corps de l'homme ou des animaux.

Si deux os s'articulant se touchent par une surface assez étendue, lors du mouvement il y aura glissement d'une de ces surfaces sur l'autre. Ces surfaces doivent dès lors répondre à certaines conditions, car deux surfaces quelconques ne peuvent pas glisser l'une sur l'autre en conservant un contact d'une certaine étendue.

Voyons d'abord quelles sont les surfaces qui jouissent d'une façon rigoureuse de cette dernière propriété.

Au point de vue strict elles ne sont qu'au nombre de trois : le plan, le cylindre à base circulaire et la sphère.

Supposons que les deux surfaces par lesquelles deux os se mettent en contact soient toutes deux des plans, ces deux plans pourront glisser l'un sur l'autre dans toutes les directions en conservant toujours un contact parfait. Si l'un des deux os est supposé fixe, l'autre se déplacera, une certaine ligne de cet os mobile restant toujours perpendiculaire au plan articulaire.

Si un des os se termine par une sphère convexe nommée tête articulaire, l'autre os portera une sphère concave de même rayon qui sera la cavité articulaire. Lorsque la tête articulaire sera dans sa cavité, l'un des os étant supposé fixe, l'autre sera mobile autour du centre de la sphère. Il pourra tourner angulairement dans toutes les directions autour de ce centre, comme s'il était terminé par une pointe très dure prenant appui au centre de la sphère.

Bien entendu ni la tête articulaire ni la cavité articulaire ne forment une sphère complète, il est aisé de comprendre que la portion de sphère correspondant à la cavité doit être moindre que celle correspondant à la tête, sans cela il n'y aurait aucun mouvement possible. Les bords de la tête articulaire sont généralement

limités par des saillies rugueuses dont le contact avec le bord de la cavité limite le mouvement.

En troisième lieu nous pouvons avoir une articulation basée sur le cylindre. Supposons un cylindre circulaire plein s'articulant avec un autre cylindre en creux se moulant exactement sur le premier, l'un des os pourra tourner autour de l'autre comme s'il était fixé à un axe rigide. Mais les mouvements ne se borneront pas à une simple rotation, il pourra y avoir en même temps des glissements dans le sens parallèle à l'axe du cylindre, ces glissements seront plus ou moins importants, et pour qu'ils soient déterminés, il faudra qu'il y ait sur l'un des os une rainure en saillie correspondant sur l'autre os à une rainure en creux. Il se produit là une disposition analogue à celle du filet de vis en saillie d'un côté et en creux sur l'écrou. De cette façon, l'articulation en question permet à l'un des os de prendre par rapport à l'autre ce que l'on appelle un mouvement hélicoïdal.

Si les surfaces articulaires étaient absolument rigides et dures, il n'y aurait donc que les articulations en plan, cylindre et sphère, pour lesquelles il pourrait y avoir un contact constant d'une certaine étendue entre les deux os pendant leur mouvement. De pareilles surfaces sont dites surfaces congruentes. Mais grâce à l'élasticité des cartilages qui recouvrent les parties articulaires, deux surfaces peuvent s'articuler entre elles de façon satisfaisante sans répondre rigoureusement aux conditions que nous venons d'indiquer.

Par exemple, dans une articulation cylindrique, le cylindre

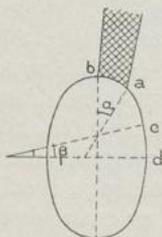


Fig. 61.

pourra ne pas être circulaire, mais de rayon variable. Il est facile de voir ce qui en résultera. Supposons que la figure 61 représente la coupe d'une tête articulaire de ce genre, la cavité articulaire tenant à la partie ombrée, on voit immédiatement que lorsque la cavité articulaire se trouve dans la région *ab* de forte courbure, pour un certain déplacement *ab*, il y aura un déplacement angulaire de l'os égal à α . Quand le même déplacement se produira vers *cd*, il n'y aura qu'un déplacement angulaire β . De même l'articulation sphérique peut se transformer en une articulation ellipsoïdale. La tête articulaire ne peut pas alors tourner dans la cavité autour de l'axe de l'os portant la tête articulaire, mais les

mouvements angulaires sont possibles, et nous trouvons que suivant la direction dans laquelle se font ces mouvements, pour un même déplacement de l'articulation ces mouvements angulaires seront d'autant plus prononcés que la courbure suivant la direction du mouvement est plus grande.

La même approximation se retrouve dans un autre genre d'articulation dit en selle et où, dans deux directions perpendiculaires entre elles, les courbures sont de sens inverse.

Action des muscles. — Lorsqu'on a affaire à des articulations où un os se déplace par rapport à un autre par simple glissement, les muscles qui mettent ces os en mouvement doivent donner une composante dans la direction du mouvement, c'est elle seule qui sera efficace. Il faut donc projeter toutes les forces agissantes sur la direction du mouvement et faire la somme des composantes ainsi obtenues.

Quand il s'agit d'une rotation il n'en est plus de même. Prenons le cas simple d'une articulation cylindrique. Supposons que XY soit la direction de deux os longs articulés ensemble, O est l'axe du cylindre. Lorsqu'un muscle prenant son insertion en A sur l'os portant la cavité articulaire, et sur l'autre os plus loin de cette articulation, vient à se contracter, il exerce une certaine force F dans la direction AF. Pour qu'il fasse fonctionner l'articulation par une rotation autour de O il faut qu'il produise un certain moment par rapport à O, et plus ce moment sera grand, plus l'effet du muscle sera considérable. Nous savons que ce moment s'obtient en multipliant la force F par la longueur de la perpendiculaire abaissée de O sur AF, il a donc pour valeur $F \times OB$. Nous voyons qu'à valeur égale la force F sera d'autant plus efficace que la perpendiculaire OB sera plus grande, c'est pour cela qu'il est avantageux que les épiphyses soient renflées. Si elles avaient un calibre aussi réduit que la diaphyse de l'os, quand les os seraient au voisinage de l'extension le moment des forces serait très réduit. Une fois que la flexion a commencé, il n'en est plus de même. Il est facile de voir que le moment où la force est la plus efficace est celui où la ligne AF est perpendiculaire à OA.

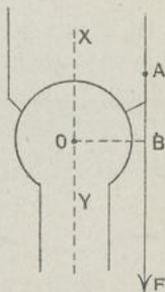


Fig. 62.

Les muscles s'insèrent toujours au voisinage de l'articulation qu'ils doivent mouvoir. Ceci n'a aucune influence tant que les os sont dans l'extension, mais c'est une cause d'infériorité quand l'articulation est fléchie. Ainsi prenons le biceps, la distance de son insertion à l'articulation du coude est d'environ $1/6$ de la distance du coude à la main : il en résulte que, si ce biceps agissait seul pour soulever un poids, il faudrait qu'il développât une force égale à six fois la valeur de ce poids. Parfois des muscles assez grêles produisent des effets qui nous semblent hors de proportion avec leur apparence, on constate alors que les insertions s'éloignent des articulations. C'est ce qui a lieu pour certains muscles des singes par exemple.

Dans le cas d'une articulation sphérique, pour avoir l'effet produit par un muscle, on prend aussi le moment de la force par rapport au centre de rotation, le mouvement se fait dans un plan passant par ce centre et la force.

VIII

PRINCIPES GÉNÉRAUX DE MÉTHODE GRAPHIQUE

On a vu précédemment l'intérêt qu'il y a de représenter la loi d'un phénomène par une courbe. Souvent, au cours d'une étude, on commence par faire un certain nombre d'observations et de mesures que l'on reporte sur un tableau numérique; par exemple, on relève, à diverses époques, le poids ou la taille d'un enfant, pour nous en tenir à ce cas simple. — Puis on traduit ce tableau numérique en une courbe qui sera d'autant meilleure que les points déterminés sont plus nombreux.

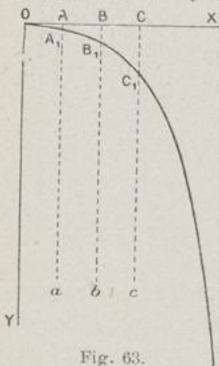


Fig. 63.

La méthode graphique a pour but de rechercher et de mettre en œuvre des artifices expérimentaux à l'aide desquels le phénomène étudié trace automatiquement,

et d'une façon continue, sa courbe représentative.

Supposons, par exemple, que l'on veuille tracer automatiquement la courbe représentative de la loi de la chute des corps; on

pourra munir d'un crayon un corps tombant librement sous l'action de la pesanteur. Si le crayon vient appuyer sur une feuille de papier verticale, à chaque instant sa pointe y marquera un point donnant la position du corps dans l'espace.

Supposons maintenant que pendant la chute, on déplace le papier de droite à gauche d'un mouvement uniforme, le crayon ne tracera pas une verticale oY (fig. 63), car le corps se trouvera sur des ordonnées différentes suivant le temps écoulé; au bout d'une seconde, il sera sur Aa , au bout de 2 secondes sur Bb , de 3 secondes sur Cc , etc. En même temps, il sera tombé de A en A' , de B en B' , de C en C' , etc. Ainsi se sera tracé automatiquement une courbe repré-

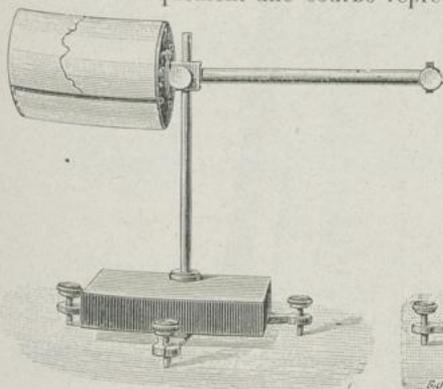


Fig. 64.

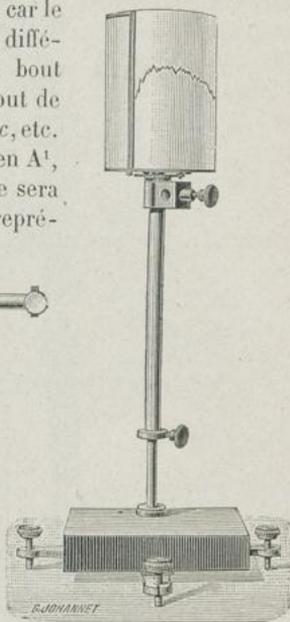


Fig. 65.

sentant la loi de la chute du corps. Au lieu de déplacer le papier plan, il est plus simple de l'enrouler autour d'un cylindre tournant uniformément autour d'un axe vertical. Chaque génératrice du cylindre viendra alors se présenter successivement au crayon; après l'opération il suffira de couper le papier et de l'étaler sur un plan pour arriver au même résultat que précédemment.

Le dispositif que nous venons d'indiquer rapidement est connu sous le nom de machine de Morin. Il renferme en principe toute la méthode graphique, et trouvera son application toutes les fois que l'on voudra enregistrer le déplacement d'un point en fonction du temps.

Il faut, lorsqu'on veut enregistrer la courbe d'un phénomène, donner à un crayon ou stylet traceur un déplacement égal ou proportionnel à chaque instant à la grandeur du phénomène. Le

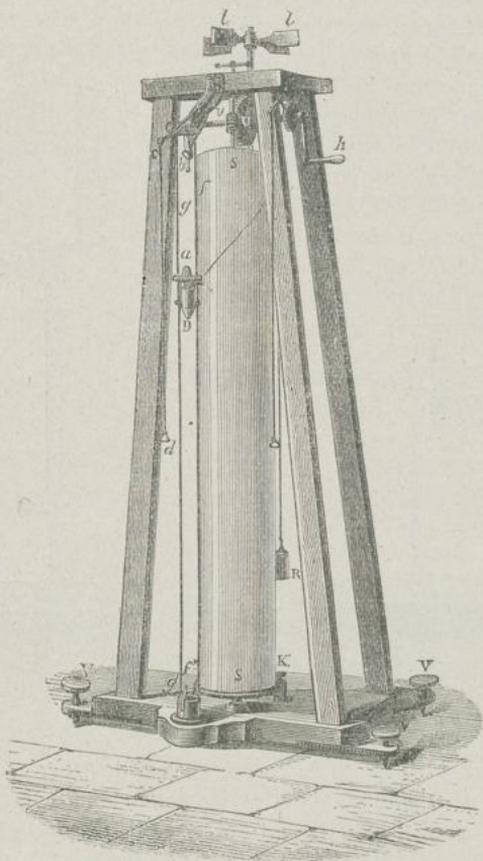


Fig. 66. — Machine Poncelet et Morin traduisant par une courbe les lois de la chute des corps.

papier sur lequel se fera le tracé devra se mouvoir en plan ou être enroulé sur un cylindre perpendiculairement au déplacement du crayon.

Le mouvement du papier doit être uniforme. Si cela n'était pas,

il faut
sur la
La
de ro
autou
ce cy
enreg
se de

être c
temps
La
réglée
cylind
autou
même
à une
dans l
En
d'horl
progre
si l'éc
cylind
la seco
très le
ment
est plu

il faudrait connaître exactement la loi de ce mouvement et faire sur la courbe des corrections laborieuses.

La façon d'obtenir plus facilement le déplacement cherché est de rouler le papier sur un cylindre tournant uniformément autour de son axe. Suivant les cas, il y aura intérêt à donner à ce cylindre une rotation plus ou moins rapide. Si le phénomène à enregistrer se passe dans un temps fort long, le papier devra se déplacer lentement; au contraire, son mouvement devra

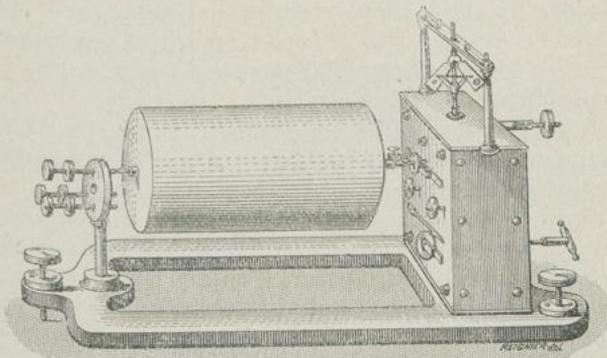


Fig. 67. — Mouvement d'horlogerie avec régulateur de Foucault.

être d'autant plus rapide que le phénomène se produit en un temps plus court.

La rotation des cylindres à mouvement lent est généralement réglée par un mouvement d'horlogerie. Il y a intérêt à ce que ces cylindres puissent tourner soit autour d'un axe horizontal, soit autour d'un axe vertical; les figures 64 et 65 représentent un même cylindre susceptible de recevoir ces deux orientations grâce à une disposition du pied. Le mouvement d'horlogerie se trouve dans l'intérieur même du cylindre.

En réalité, la rotation d'un cylindre à l'aide d'un mouvement d'horlogerie ne se fait pas d'une façon uniforme; il y a une légère progression à chaque oscillation de l'échappement. Par exemple, si l'échappement se fait à chaque seconde, toutes les secondes le cylindre effectue une légère rotation, puis reste au repos jusqu'à la seconde suivante et ainsi de suite. Lorsque le cylindre tourne très lentement, chaque progression est imperceptible et pratiquement la rotation peut être considérée comme uniforme. Il n'en est plus de même lorsqu'une vitesse plus grande est nécessaire.

Dans ce cas, le mouvement du cylindre est produit soit par un ressort, soit par un poids, et son uniformité est assurée à l'aide d'un régulateur.

Dans la machine de Morin (fig. 66), il y a un simple régulateur à ailettes et la force motrice s'obtient par un poids. Le mouvement accéléré au début devient uniforme par suite de la résistance que l'air oppose au mouvement des ailettes.

On trouve dans le commerce de petits cylindres à ressort dits polygraphes, munis d'ailettes régulatrices basées sur le même principe. En inclinant plus ou moins ces ailettes par rapport à l'axe de rotation, la résistance de l'air varie et l'on obtient des rotations plus ou moins rapides du cylindre.

Un régulateur plus parfait est celui de Foucault; les cylindres enregistreurs généralement employés dans les laboratoires français sont munis de cet appareil.

D'autres régulateurs analogues sont employés à l'étranger.

On peut aussi se servir avantageusement de cylindres mus par l'électricité. Si le moteur est muni d'un bon régulateur on a un mouvement très uniforme et facilement réglable.

Lorsqu'on prend un tracé sur un cylindre enregistreur, après une rotation, on revient au point de départ; il pourrait en résulter une superposition et une confusion entre les différentes lignes. Un moyen d'éviter cette superposition des tracés consiste à monter la pointe destinée à écrire sur le papier, sur un support se déplaçant parallèlement à l'axe du cylindre (fig. 68). Dans ces conditions, l'axe des abscisses n'est plus enroulé suivant un grand cercle du cylindre, mais décrit autour de lui une hélice. Lorsque la feuille de papier est déroulée, l'axe des ordonnées et celui des abscisses ne sont plus rigoureusement perpendiculaires entre eux (fig. 69), leur angle s'écarte d'autant plus de l'angle droit que le chariot portant le tracelet se déplace plus rapidement suivant l'axe du cylindre.

Dans beaucoup de cas il n'y a pas à tenir compte de cette inclinaison. Dans les expériences de quelque précision (fig. 69) on évite toute erreur en comptant la valeur des ordonnées parallèlement à une droite obtenue en déplaçant à la main le chariot portant le tracelet, le cylindre étant arrêté. Cette droite est une des génératrices du cylindre enregistreur et donne par suite la direction du déplacement que l'on enregistre.

Un autre procédé pour éviter la superposition des tracés con-

siste
de pa
d'être
très g
gnés l

mus p
un ré
D'a
déro
pour
cylind
procé
s'effac
papier
Il v
bande
figure
Il y
animé
phéno
meme

siste à employer dans les opérations de longue durée une bande de papier de grande étendue. Cette bande de papier, au lieu d'être enroulée sur un seul cylindre, qu'il faudrait prendre de très grand diamètre, passe sur deux cylindres parallèles et éloignés l'un de l'autre (fig. 70). Ces appareils sont généralement

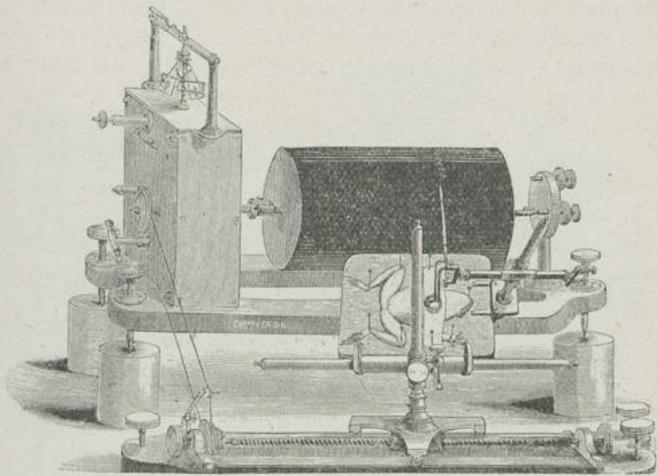


Fig. 68.

mus par un poids; l'uniformité du mouvement est assurée par un régulateur à ailettes tournant dans l'air ou dans un liquide.

D'autre fois, une bande de papier se déroule d'un premier cylindre magasin pour aller s'enrouler sur un second cylindre récepteur; mais l'emploi de ce procédé est limité, car les tracés peuvent s'effacer lorsque les différentes spires de papier se recouvrent les unes les autres.

Il vaut mieux alors faire passer une bande de papier dans un simple laminoir, comme le représente la figure 71.

Il y a des cas où la surface destinée à recevoir le tracé doit être animée d'une très grande vitesse; cela a lieu chaque fois que le phénomène à enregistrer se passe dans un espace de temps extrêmement court. On ne peut alors employer le cylindre tournant,

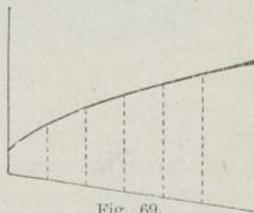


Fig. 69.

car il y aurait fatalement des superpositions de courbes qui rendraient les tracés très difficiles à lire. Il faut alors revenir au plan se déplaçant soit en chute libre sous l'influence de la pesanteur, soit par une traction mécanique. L'expérience ne peut dans ce cas être de longue durée, ce qui n'a généralement pas d'inconvénient, puisque l'on s'adresse précisément à un phénomène s'écoulant dans un temps très bref.

Dans les appareils où le phénomène à enregistrer développe une

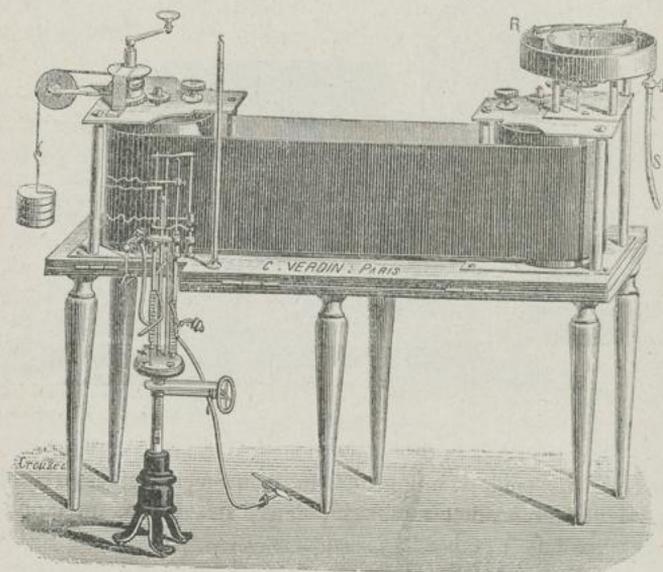


Fig. 70. — Enregistreur à poids.

force très considérable, on peut effectuer les tracés soit à l'aide d'un crayon, soit encore mieux d'une plume. C'est le procédé qui est employé, par exemple, dans un grand nombre d'instruments de météorologie ou d'appareils industriels, mais, lorsqu'il s'agit de petites forces, lorsque la moindre résistance peut altérer la forme du tracé, il faut éviter tout frottement du tracelet. C'est le cas qui se présente généralement dans les expériences de physiologie. On emploie alors un papier parfaitement glacé et recouvert d'une légère couche de noir de fumée, sur laquelle le moindre frôlement d'un levier très souple laissera une trace.

Pour enfumer le papier, on le colle d'abord avec soin sur le cylindre enregistreur, puis, animant le cylindre d'une vitesse d'environ un ou deux tours par seconde, on fait passer sous le papier une flamme fumeuse. Il est peu à craindre de brûler le papier, car il est appliqué sur une surface métallique qui lui enlève toute la chaleur communiquée par la flamme.

On peut enfumer à l'aide d'un petit morceau de camphre; l'opé-

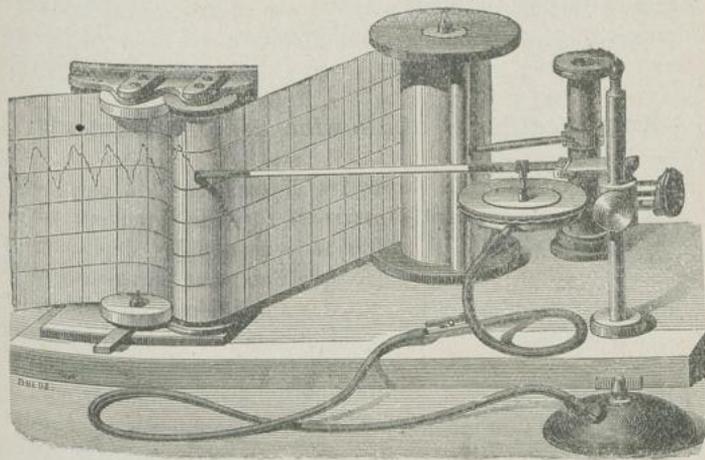


Fig. 71. — Polygraphe à bande de papier sans fin.

ration est très rapidement faite, car le camphre, dans sa combustion, produit énormément de fumée; mais ce dégagement est extrêmement désagréable dans les appartements, et de plus la couche de noir déposée sur le cylindre n'est pas très fine, de telle sorte que, quelque parfaite que soit la pointe du tracelet, les tracés obtenus manquent de délicatesse.

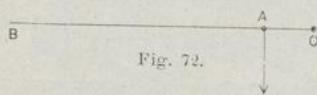
On a de bons résultats avec ce que l'on appelle le rat de cave, qu'il est très aisé de se procurer chez tous les épiciers; mais l'enfumage le plus parfait se fait avec une petite lampe à huile analogue à celle des lanternes de voiture. En ne faisant pas la mèche trop longue, on a sur le papier glacé une couche de noir de fumée des plus fines, et l'opération peut s'exécuter sans inconvénient dans un appartement.

Une fois les tracés terminés sur le papier glacé, on le coupe suivant une génératrice du cylindre et on le fait passer dans un liquide

fixateur. On obtient d'excellents fixateurs en dissolvant du benjoin ou de la gomme laque dans l'alcool, à saturation, puis ajoutant 1-2 g. de térébenthine de Venise par litre. Il faut éviter de prendre des solutions trop concentrées. Le liquide se verse soit dans une cuvette à photographie, soit, mieux encore, dans une gouttière demi-cylindrique. On y passe la feuille à fixer en la tenant par les deux extrémités, puis on la fait sécher en laissant égoutter librement le liquide. Le tracé ainsi fixé se conserve indéfiniment et ne risque nullement de s'effacer.

Amplification et diminution des déplacements.

Dans la machine de Morin, les déplacements du corps dont on étudie le mouvement s'inscrivent en vraie grandeur sur le cylindre enregistreur. Il arrive souvent que les déplacements



que l'on veut enregistrer aient des amplitudes trop faibles, les sinuosités de la courbe inscrite sur le papier seraient trop petites pour pouvoir être relevées et étudiées sans grande erreur; il faut, pendant l'inscription du phénomène, amplifier le tracé. Pour cela (fig. 72), on relie le point qui se déplace à un levier mobile en O; soit A le point d'attache. L'extrémité B du levier se déplacera sur la surface enfumée et, par suite, on aura une courbe à ordonnées d'autant plus grandes que OB est plus long et que OA est plus court, les ordonnées ont été amplifiées dans le rapport $\frac{OB}{OA}$. Ainsi, si OA a 1 cm. et si OB en a 10, les ordonnées de la courbe seront 10 fois plus grandes que si on avait enregistré directement le déplacement du point A égal au déplacement du point mobile.

Il est très important de rendre ce petit levier aussi léger que possible. L'expérience et la théorie font voir qu'un levier ayant une inertie sensible déforme la courbe. Il faut donc diminuer cette inertie autant que le permettent les conditions de rigidité de l'appareil. Bien des instruments donnent des indications erronées par suite de l'inertie des pièces en mouvement. Les leviers peuvent se faire à l'aide d'un brin de paille, mais on en obtient de meilleurs avec un petit fragment de bambou fendu en lame mince et amené à la lime à l'épaisseur d'une feuille de papier un peu fort. A l'extré-

mité, on
souple,
d'une co
Il arri
ait à le r
l'amplitu
enregist
seuleme
de rotati
trouve a
de rotati
vement.

Dans
de grad

prend u
indique
longueu
absolun
rotation
sur l'ax
une sec
parfaite

mité, on fixe un petit style de clinquant ou de plume d'oiseau très souple, que l'on colle au levier avec un peu de cire molle ou d'une colle quelconque.

Il arrive aussi, qu'au lieu d'avoir à amplifier un mouvement, on ait à le réduire. C'est ce qui a lieu, par exemple, chaque fois que l'amplitude du mouvement dépasse les dimensions du cylindre enregistreur. On peut encore, dans ce cas, se servir d'un levier; seulement, au lieu d'attacher le point mobile au voisinage de l'axe de rotation, on le fixe à l'extrémité de ce levier et le style qui se trouve au contact du cylindre se place d'autant plus près de l'axe de rotation que l'on veut réduire davantage l'amplitude du mouvement.

Chronographie.

Dans toutes les représentations par courbes, il est indispensable de graduer les axes de coordonnées. En particulier, quand on

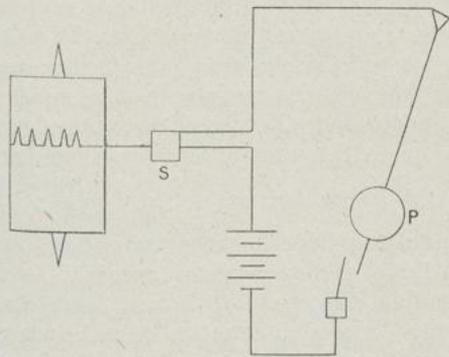


Fig. 73.

prend un tracé par un procédé graphique quelconque, il faut indiquer sur l'axe des abscisses à quelle durée correspond une longueur déterminée. Si le cylindre employé tourne d'une façon absolument uniforme, il suffit de connaître la durée de cette rotation et la circonférence du cylindre pour pouvoir indiquer, sur l'axe des abscisses, quelle est la longueur correspondant à une seconde par exemple. Mais l'on n'est jamais certain de la parfaite uniformité de rotation du cylindre; il y a intérêt à la con-

trôler; de plus, il est avantageux, pour faciliter les lectures et les mesures, de porter sur l'axe des abscisses des divisions correspondant aux unités de temps choisies. Suivant la rapidité du phénomène étudié et, par suite, suivant la rotation du cylindre, on emploiera des procédés différents.

Pour les phénomènes très lents où la division de l'axe des abscisses doit se faire en jours, heures, minutes ou même secondes, on peut se servir d'horloges ordinaires donnant cette fraction du temps.

Par exemple, supposons que l'on veuille diviser l'axe des abscisses en secondes. On établira, toutes les secondes, un contact à l'aide d'un pendule P de longueur convenable; ce contact commandera un signal électrique S qui fera un pointage sur le cylindre tournant (fig. 73). Il est évident que le même principe s'applique au pointage des minutes ou des heures; seulement au lieu de produire un contact à l'aide d'un pendule, il se fera par les aiguilles d'une montre ou par tout autre artifice.

Un métronome analogue à celui dont se servent les musiciens peut aussi être d'un assez bon usage; il suffit de disposer des contacts sur l'instrument, de façon à transmettre ses indications au signal électrique chargé de pointer le temps sur le cylindre.

Lorsque l'unité de temps choisie devient inférieure à une seconde, ce qui a lieu souvent en physiologie, lorsque, par exemple, il faut diviser l'axe des abscisses en $\frac{1}{10}$ ou en $\frac{1}{100}$ de seconde, et même parfois en fractions plus petites, il ne peut plus être question d'employer le pendule pour produire les contacts. On se sert alors d'un diapason. Ce diapason devra être entretenu électriquement. Pour cela, entre ses deux branches se trouve une bobine de fil conducteur contenant un fer doux et pouvant former électro-aimant. Un fil de platine vient toucher extérieurement une des branches du diapason et fermer le circuit d'une pile dont le courant peut traverser l'électro-aimant. Au moment où le courant passe, l'électro-aimant attire les deux branches du diapason et le contact avec le fil de platine extérieur est rompu; le diapason tend à revenir à sa position, qu'il dépasse en vibrant; ce mouvement rétablit le contact, et, par suite, l'attraction recommence et ainsi de suite.

On voit qu'il se produit autant d'interruptions dans le courant que de vibrations du diapason; par conséquent, si l'on met

dans le
pointer s
comme
Pour q
les indic
sur le cy
On po
le fait, n
d'un peti
de façon
mais sou
aussi lib
rience, i
D'ailleurs
et, par s
a donc
indépen

Les si
sur les

s'en se

ans le circuit de la pile un signal électrique, ce signal pourra pointer sur le cylindre enregistreur les vibrations du diapason comme il pointait les oscillations du pendule.

Pour que ce dispositif puisse fonctionner, il faut que les indications du signal électrique destiné à pointer sur le cylindre enregistreur soient très rapides.

On pourrait, il est vrai, et dans certains cas on le fait, munir directement l'extrémité du diapason d'un petit stylet très souple, et l'approcher du cylindre de façon qu'il y trace directement ses oscillations; mais souvent les abords du cylindre doivent rester aussi libres que possible pour les besoins de l'expérience, il est alors difficile de placer convenablement le diapason. D'ailleurs, ce diapason pourrait ébranler le support qui le porte et, par suite, déformer la courbe du phénomène enregistré; il y a donc tout intérêt à transmettre ses indications à un signal indépendant moins encombrant.

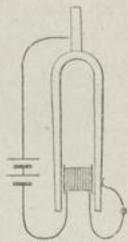


Fig. 74.

Signaux électriques.

Les signaux dont on se sert en physiologie ont été construits sur les indications de M. Marcel Desprez et peuvent, lorsqu'on

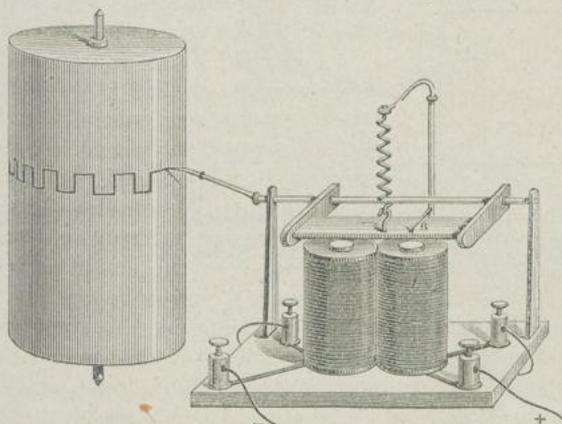


Fig. 75. — Figure théorique du signal électrique de Desprez.

s'en sert convenablement, donner 700 à 800 indications par

seconde, ce qui dépasse de beaucoup les nécessités de la pratique.

Ces signaux se composent d'un très petit électro-aimant pouvant attirer un petit fer doux très léger, quand un courant passe dans la bobine. Ce fer doux est mobile autour d'un axe qui porte un

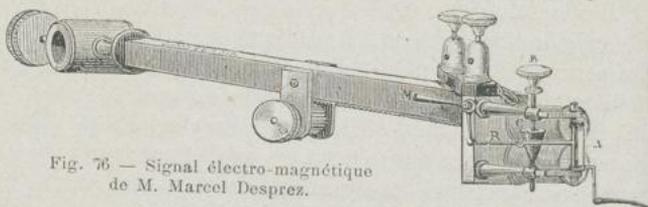


Fig. 76 — Signal electro-magnétique de M. Marcel Desprez.

petit stylet. Ce sont les oscillations de ce stylet que l'on enregistre sur le cylindre tournant. Lorsque le courant cesse de passer dans le signal, il faut que le fer doux s'éloigne de l'électro-aimant; cet effet s'obtient à l'aide d'un petit ressort que l'on tend convenablement. Il faut avoir soin de ne pas laisser

le contact en fer doux se coller sur le fer de l'électro-aimant; sans cela, il ne s'en sépare plus que difficilement par suite du magnétisme rémanent. Cet accident s'évite facilement en interposant entre les deux surfaces une petite feuille de papier de soie que l'on y colle avec un peu de cire molle.

Le signal de Marcel Desprez est, d'une façon générale, destiné à inscrire sur le cylindre enregistreur le moment où se passe un phénomène. Pour cela on intercale dans un même circuit le signal, une pile, et un appareil, variable selon les circonstances, qui fermera ou rompra le circuit au moment où se passe le phénomène que l'on veut étudier.

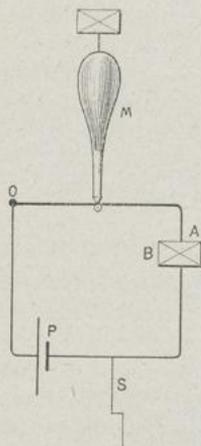


Fig. 77.

Par exemple, supposons que l'on veuille connaître l'instant où un muscle commence à se contracter. On reliera le muscle à un levier métallique mobile autour de O et reposant en A sur un contact B (fig. 77). Le signal S sera traversé par le courant de la pile P, et armé. Aussitôt que le muscle commencera à se raccourcir, le contact se rompra en A, le courant cessera de passer à travers le signal qui se désarmera et fera une marque sur la ligne qu'il trace sur le cylindre enregistreur.

Il est enregistré
inscrire
un enreg
leur et
mandabl
points d
les circ
mettent.
dispositi
ou même



Fig. 79.

gistr
sur lequ
peut être
treur; c'
et de la
permette

Tambours de Marey.

Il est parfois possible de relier le point mobile dont on veut enregistrer les déplacements au levier ou au tracelet destiné à inscrire ces déplacements sur le cylindre enregistreur, on a alors un enregistrement direct, c'est le procédé le plus simple, le meilleur et le plus recommandable, à tous les points de vue, lorsque les circonstances le permettent. Souvent, si le dispositif général d'une expérience est compliqué, il est difficile ou même impossible d'accumuler au voisinage du cylindre enre-

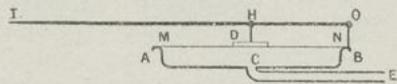


Fig. 78.

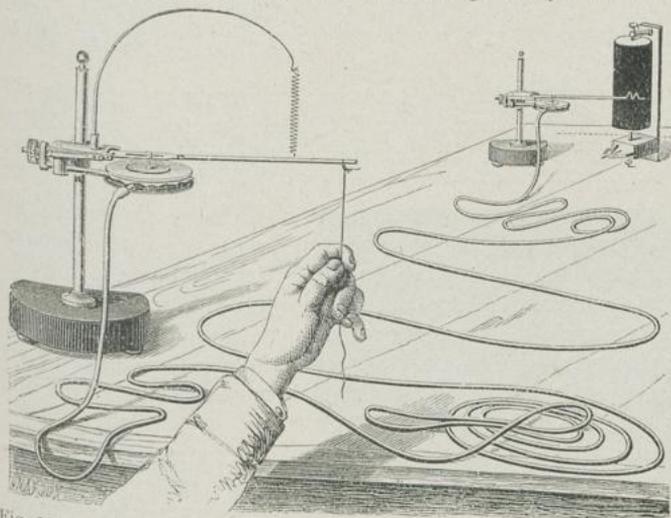


Fig. 79. — Tambours à leviers conjugués pour la transmission des mouvements à distance.

gistrer les divers appareils dont on a besoin. D'autres fois le corps sur lequel on veut enregistrer un phénomène est mobile et ne peut être suivi dans tous ses mouvements par l'appareil enregistreur; c'est ce qui arrive, par exemple, dans l'étude de la marche et de la locomotion des animaux. Les signaux électriques nous permettent déjà de transmettre à distance toutes les indications

relatives au temps, mais ils ne sont d'aucune utilité dans ce qui concerne la représentation par une courbe du déplacement d'un point. L'appareil qui permet de transmettre un mouvement à distance se compose d'un manipulateur et d'un récepteur. Nous allons d'abord décrire le récepteur. Il consiste essentiellement en une petite cuvette ou petit tambour métallique de forme très plate et représenté en coupe par AB (fig. 78). Le fond de cette cuvette est percé d'un trou C, en communication avec un tube métallique CE. La partie supérieure de la cuvette est recouverte par une membrane de caoutchouc MN au milieu de laquelle repose un petit disque métallique très léger D. Ce disque est articulé en H, avec un levier mobile en un point fixe O. Il est aisé de voir que si l'on vient à comprimer de l'air par le tube EC, la membrane de caoutchouc se gonflera et le levier OH se soulèvera; son extrémité I inscrira sur le cylindre enregistreur tous ses déplacements et par suite toutes les compressions d'air qui se produisent.

Ce récepteur est relié à un autre tambour du même genre par un tube en caoutchouc fixé en E. Ce deuxième tambour ne diffère du premier que par son levier qui est très rigide et solide, alors que celui du récepteur est surtout léger (fig. 79).

Il est aisé de voir sur la figure 79, qu'à chaque abaissement du levier du manipulateur, il se produit dans le tambour manipulateur, une onde de compression qui se transmet par le tube de caoutchouc au récepteur dont le levier se soulèvera. Les diverses excursions du manipulateur seront ainsi transmises, et il suffira de placer le levier du récepteur contre le cylindre tournant, pour y enregistrer la courbe représentant le mouvement de l'extrémité du levier du manipulateur.

Au lieu d'employer comme manipulateur un tambour de Marey, on se sert parfois d'appareils divers que suggèrent les nécessités de chaque expérience; mais tous ces instruments, dont on verra des exemples dans la suite, sont basés sur le même principe, et ont pour effet de produire dans le récepteur une série de compressions de l'air qui y est contenu.

Les tambours de Marey ont subi diverses modifications de détail ayant pour but de les rendre réglables, et de faciliter leur mise en place sur les supports du chariot automobile.

Lorsqu'on vient d'installer une transmission de mouvement à l'aide de signaux à air, il arrive souvent, par suite de mouvements

donnés
appare
sphéris
l'extéri

comme
pape q
récepte
l'appar
est en

Con
mouve
manipu
moins
longue
tube de
les der
très sin
vitesse
onde a
de caou
deux
on pro
longue
mités d
tambou
sont au
sur un
partant
choc a
indicat
éloigné

donnés aux appareils, que la pression du gaz à l'intérieur de ces appareils se soit élevée ou abaissée par rapport à la pression atmosphérique. Pour ramener l'égalité de pression à l'intérieur et à l'extérieur, ce qui est une condition de bon fonctionnement,

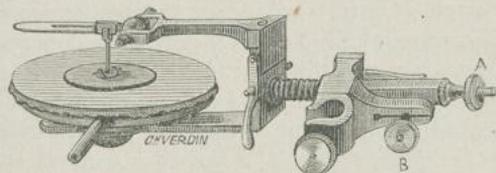


Fig. 80. — Tambour à levier récepteur.

comme le démontre l'expérience, il suffit d'ouvrir une petite soupape qui se trouve sur le tube de réunion du manipulateur et du récepteur et qui établit une communication entre l'intérieur de l'appareil et l'atmosphère. Aussitôt la soupape fermée, l'appareil est en état de fonctionner.

Contrôle et correction des tambours de Marey. — Les mouvements ne se transmettent pas instantanément du tambour manipulateur au récepteur; il y a un certain retard plus ou moins grand, suivant la longueur et le diamètre du tube de caoutchouc qui relie les deux tambours. Il est très simple de mesurer la vitesse de propagation d'une onde aérienne dans le tube de caoutchouc qui relie ces deux signaux. Pour cela, on prend un tube aussi long que possible, aux extrémités duquel on place deux tambours dont les styles

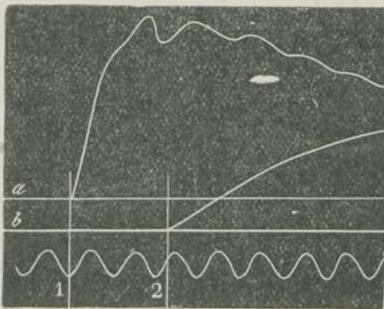


Fig. 81. — Retard des signaux à air.

sont au contact d'un cylindre enregistreur. On donne un choc sur un point du tube en caoutchouc; il en résulte deux ondes partant de ce point et provoquant une indication des signaux. Si le choc a été donné à égale distance des deux tambours, les deux indications se produisent en même temps; sinon l'appareil plus éloigné est en retard sur le plus rapproché.

Si, dans ce dernier cas, on a eu soin, comme l'indique la figure, d'inscrire en même temps la courbe d'un diapason donnant 100 vibrations par seconde, on connaît le retard d'un des signaux. Il suffit de mesurer la différence de chemin parcouru par les deux ondes pour en déduire la vitesse de propagation d'une onde de compression dans le tube dont on se sert, cette donnée peut, dans certains cas, avoir son utilité.

On emploie généralement des tubes de caoutchouc de 4 millimètres de diamètre intérieur; la vitesse de propagation d'une onde est alors d'environ 280 m. à la seconde; dans chaque cas, il sera facile de calculer le retard des signaux.

Lorsque l'on emploie simultanément deux ou plusieurs tambours, il y a intérêt à uniformiser leurs retards, c'est-à-dire à prendre pour chacun d'eux des tubes de caoutchouc de la même longueur et, bien entendu, du même diamètre intérieur.

IX

MYOGRAPHIE

Pour étudier la contraction musculaire par les procédés de la méthode graphique, il suffit de relier l'extrémité d'un muscle, préalablement libérée de son insertion, à un petit levier inscri-

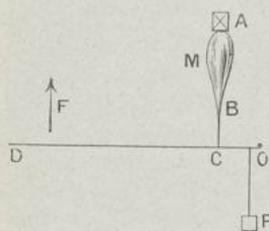


Fig. 82.

vant ses déplacements sur un cylindre tournant. Le myographe direct est l'appareil enregistreur le plus simple que l'on puisse imaginer. Il se compose en somme, essentiellement, d'un levier mobile autour d'un axe O. Le muscle sur lequel on opère est fixé en A par une de ses extrémités. L'autre extrémité B est reliée au levier en C. Quand le muscle se contracte, le levier myographique se déplace dans le sens de la flèche F; le poids P placé au voisinage de l'axe O a pour but de ramener le levier à sa position initiale quand le muscle se relâche. La pointe D du levier inscrit ses déplacements sur un cylindre enfumé, et l'amplitude des ordonnées de la courbe est d'autant plus grande, pour un même raccourcissement du muscle, que le levier OD est plus

long et que le point d'attache C du muscle au levier est plus rapproché de l'axe de rotation O. C'est là le principe de tous les myographes. Le premier appareil de ce genre est dû à Helmholtz (fig. 83). Il se compose essentiellement d'un cadre mobile autour d'un axe, et auquel le muscle à étudier est rattaché par un fil; l'extension du muscle est produite par un petit poids. Le myographe de Helmholtz avait, entre autres inconvénients, celui

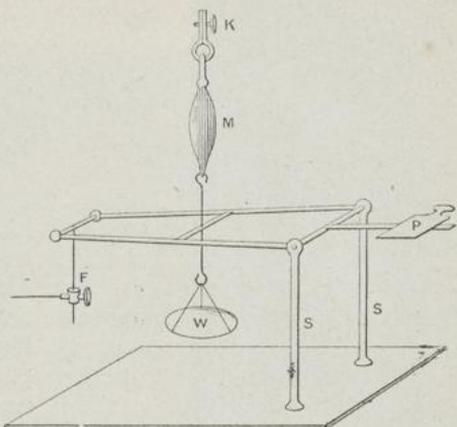


Fig. 83.

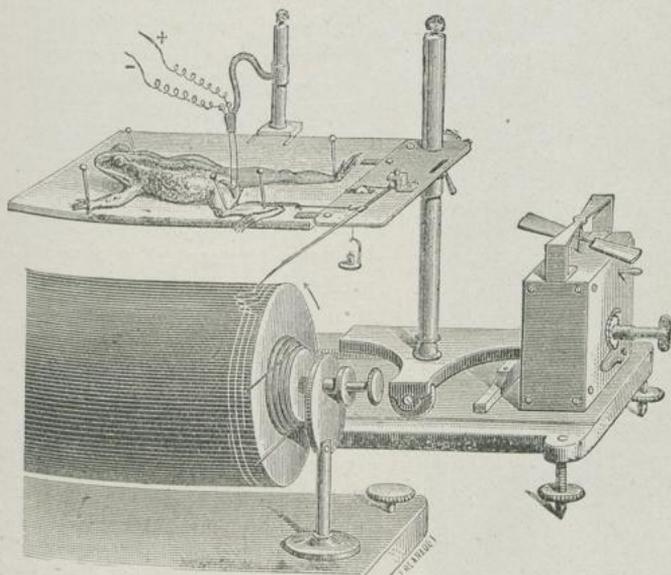


Fig. 84. — Myographe simple.

d'être lourd; son inertie déformait la courbe de contraction

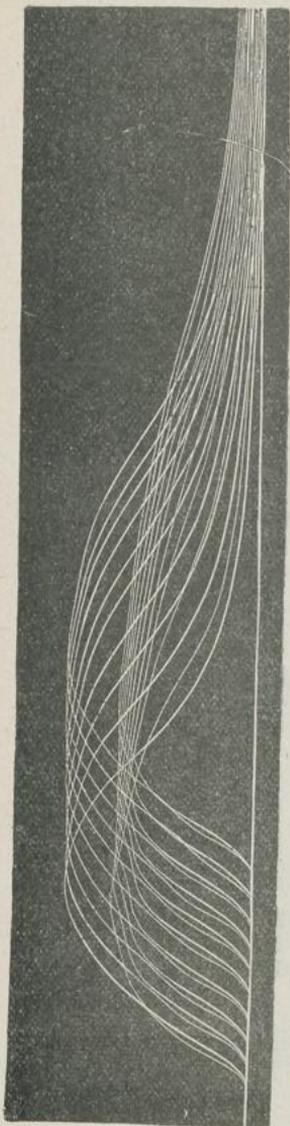


Fig. 86.

Aussi divers physiologistes l'ont-ils modifié. Le meilleur modèle actuellement en usage est celui de Marey (fig. 84). Il est plus spécialement destiné à prendre des tracés de la contraction musculaire de la grenouille; c'est, du reste, sur cet animal qu'ont été faits la plupart des travaux relatifs au muscle. La grenouille soumise à l'expérience est fixée par des épingles sur une plaque de liège portée par un support métallique. Le muscle gastrocnémien, détaché de son extrémité inférieure, est relié par un fil au levier myographique. En faisant varier la distance de ce point d'attache au point de rotation du levier, on modifie l'amplitude des tracés. A cet effet, le fil venant du muscle est fixé à un petit curseur mobile le long du levier. Pour exercer sur ce muscle une tension convenable et ramener le levier au zéro au moment de son relâchement, on se sert soit d'un ressort, soit d'un poids tenseur. Le poids tenseur est généralement préférable, car le muscle doit vaincre ainsi une résistance constante et les conditions de l'expérience sont plus faciles à déterminer; avec un ressort, la traction antagoniste va en croissant avec le degré du raccourcissement musculaire et de la flexion du ressort. Dans le cas de la figure 84, on voit aussi deux électrodes qui servent à provoquer la contraction par excitation du nerf sciatique.

Il faut, bien entendu, dans ces expériences, éviter les mouve-

ment
ment i

Fig.
soit à

Fig. 87.
sur le
conser

ments volontaires de l'animal qui donneraient un tracé absolument irrégulier. Les deux procédés les plus employés consistent,

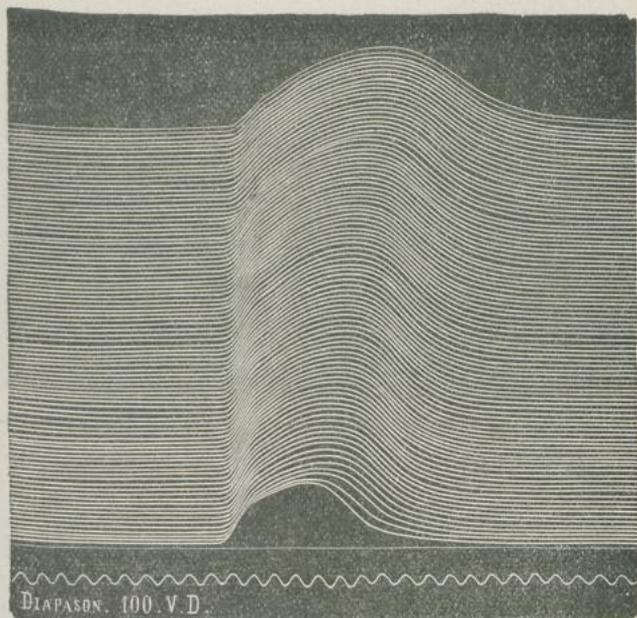


Fig. 86. — Graphique de secousses musculaires imbriquées verticalement.

soit à faire usage du curare si l'excitation doit porter directement

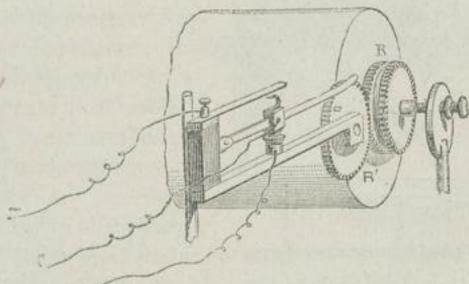


Fig. 87. — Appareil destiné à exciter les nerfs à certains instants de la rotation du cylindre.

sur le muscle, soit à détruire la moelle de l'animal si l'on veut conserver l'excitabilité des nerfs. Cette opération se fait facile-

ment avec une aiguille que l'on introduit dans le canal rachidien, immédiatement derrière la tête.

Les résultats que l'on obtient dans le tracé myographique sont

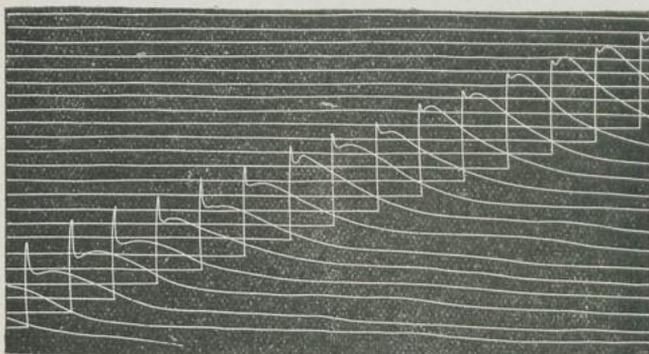


Fig. 88. — Secousses musculaires disposées en imbrication oblique (vératrine).

influencés par l'état de la circulation. Le tracé 83 fait voir la différence qu'il y a entre les contractions qui se produisent dans une patte de grenouille privée de sa circulation, comparativement à l'autre patte restée à l'état normal. Il faut donc avoir soin, dans les expériences, de ne pas léser un gros vaisseau de la cuisse, ce qui arrive facilement quand on veut dégager le sciatique.

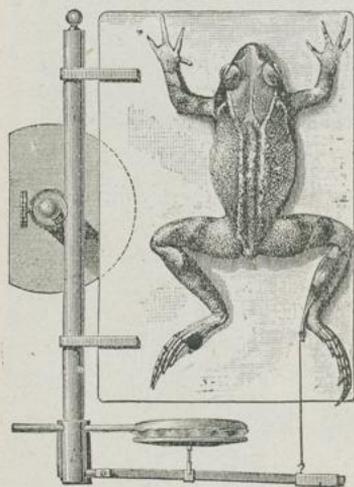


Fig. 89. — Myographe à transmission.

Pour avoir un tracé disposé régulièrement et permettant une comparaison facile des secousses, on s'arrange de façon que le cylindre produise automatiquement l'excitation à un moment donné de sa révolution. Dans ces conditions, si le myographe est monté sur le chariot automatique représenté sur la figure 68, et destiné à éviter les superpositions, on a le tracé de la figure 86.

L'excitation automatique se produit à l'aide d'une petite clef de décharge (fig. 87). Pour cela, une roue dentée R de 100 dents, montée sur l'axe du cylindre, engrène avec une autre roue pareille R' munie d'un taquet; à chaque révolution du cylindre c'est ce petit taquet qui vient agir sur la clef de décharge.

Avec cette disposition des tracés, il y a parfois de légères con-

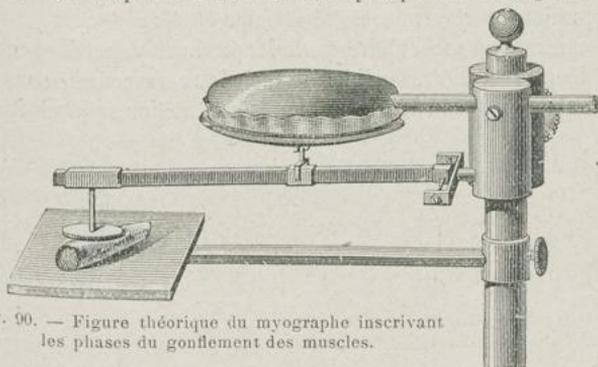


Fig. 90. — Figure théorique du myographe inscrivant les phases du gonflement des muscles.

fusions de lignes si le chariot automoteur ne va pas assez vite. Si, au contraire, on donne à la roue R' 101 dents, elle tournera un peu moins vite que le cylindre; à chaque tour, l'excitation sera un peu en retard sur la précédente et le tracé se disposera en escalier, d'une façon très lisible, comme l'indique la figure 88.

Il est parfois difficile d'inscrire directement les raccourcissements du muscle; on opère alors par transmission avec les signaux à air. Le muscle est relié au levier d'un tambour manipulateur comme l'indique la figure 89; les mouvements de ce manipulateur sont, d'après le principe représenté sur la figure 79, transmis à un tambour récepteur qui inscrira sur le cylindre enregistreur.

Au lieu d'enregistrer la variation de longueur d'un muscle au moment de sa contraction, on peut, en disposant l'expérience comme sur la figure 90, inscrire son gonflement. Ce procédé est du reste le seul applicable sur les animaux que l'on ne veut pas

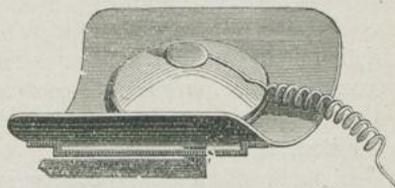


Fig. 91. — Myographe applicable à l'homme; il traduit le gonflement des muscles.

sacrier, et sur l'homme. Pour faire de la myographie sur l'homme, on emploie un tambour de Marey logé dans une sorte de gouttière comme l'indique la figure 91. Cette gouttière est placée et fixée, à l'aide de bandes, contre le muscle que l'on veut explorer. Au moment de la contraction, par suite du gonflement du muscle, le tambour qui se trouve dans la gouttière est comprimé et cette compression est transmise au tambour récepteur.

La contraction musculaire peut se produire dans deux conditions bien différentes. Ou bien le muscle se raccourcit sous une force antagoniste constante, ou bien la contraction se produit sans

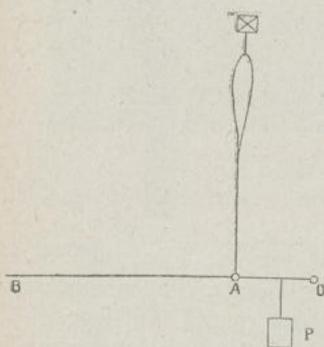


Fig. 92.

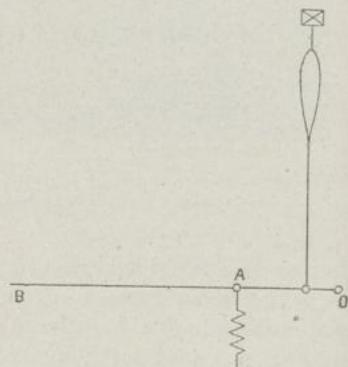


Fig. 93.

variation de longueur. C'est ce que Fick a distingué sous le nom de contraction *isotonique* et de contraction *isométrique*.

Considérons un muscle relié au levier myographique en A, ce levier étant ramené au zéro par un poids tenseur (fig. 92.) Il est évident que, pendant toute la contraction, la traction exercée sur le muscle restera la même; l'extrémité B du levier inscrira sur le cylindre enregistreur la courbe de raccourcissement du muscle; la contraction est *isotonique*.

Supposons, au contraire, que le fil attaché au tendon se fixe au levier myographique très près de l'axe de rotation, la force antagoniste étant produite par un ressort placé à une certaine distance du point O (fig. 93). Lorsque l'on provoquera la contraction, le levier se déplacera, mais le muscle ne pourra pour ainsi dire pas se raccourcir; la contraction sera *isométrique*.

Si le ressort a été préalablement gradué, l'étude de la courbe

tracée p
muscle.

Quan
d'une es
presque
appelle

La se
que la
trois pé
premier
(fig. 94)
tation

avec plu

En se
sitôt du
Ce musc
diateme
tive; il
temps as

La p
courbe
La form
animaux

Il est

forme de
peu long
baisse lé
augmen
aux mo
irritabili
électro-j

Outre

de la co
La te
exemple
gastrocn
la tempé
allongée
rapidem
0° on vo

tracée par B donnera à chaque instant la force développée par le muscle.

Quand on provoque une contraction musculaire sous l'influence d'une excitation très brève, le muscle se raccourcit et revient presque immédiatement à sa longueur primitive; on a ce que l'on appelle une secousse musculaire.

La secousse isotonique a été beaucoup plus étudiée jusqu'ici que la secousse isométrique. Cette secousse peut se diviser en trois périodes. On constate tout d'abord, après l'excitation, une première période AB pendant laquelle le muscle reste au repos (fig. 94); elle correspond à ce que l'on appelle la *période d'excitation latente*, ou *temps perdu* de Helmholtz; elle sera étudiée avec plus de détails en électro-physiologie.

En second lieu vient la période d'ascension BC suivie tout aussitôt du relâchement du muscle.

Ce muscle ne revient pas immédiatement à sa longueur primitive; il lui faut pour cela un temps assez considérable.

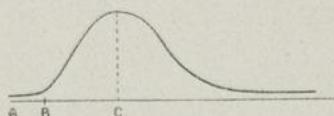


Fig. 94.

La période de descente de la courbe est généralement plus longue que la période d'ascension. La forme de cette courbe varie d'ailleurs beaucoup suivant les animaux et même suivant les divers muscles d'un même animal.

Il est difficile, dans les expériences de ce genre, de maintenir la forme de la courbe myographique constante pendant un temps un peu long; peu à peu cette forme se modifie, l'amplitude du tracé baisse légèrement pendant que la durée générale de la contraction augmente. Cet effet est dû à deux causes, à la fatigue du muscle et aux modifications que les excitations successives apportent à son irritabilité. Ce dernier point sera traité avec plus de détails en électro-physiologie.

Outre la fatigue, diverses influences peuvent modifier la forme de la courbe myographique.

La température agit de la façon la plus remarquable. Si, par exemple, on prend un tracé de la secousse musculaire sur le gastrocnémien d'une grenouille, et que l'on fasse peu à peu varier la température, on obtient à 0° une belle secousse, très haute, très allongée. Au-dessous de 0° la contractilité du muscle baisse très rapidement pour disparaître aux environs de - 5°. Au-dessus de 0° on voit aussi la hauteur de la secousse s'abaisser en même temps

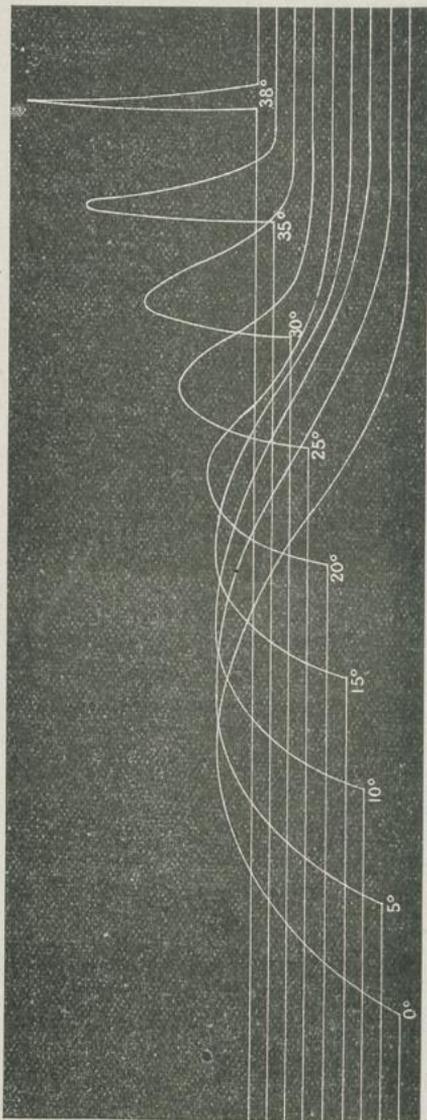


Fig. 95.

que sa rapidité augmente, la secousse inscrite sur le tracé devient de plus en plus courte. Mais, tandis que la rapidité de la secousse augmente toujours avec la température, jusqu'au moment de sa disparition, on voit la hauteur baisser à partir de 0° jusque vers 19°, où elle passe par un minimum. Au-dessus de 19° elle augmente de nouveau jusqu'à 38° environ, puis tombe très rapidement. La figure 95 représente un tracé pris dans ces conditions et la figure 96 est un schéma des variations de hauteur de la secousse avec la température.

Au delà de 38°, en même temps que la hauteur de la secousse tombe, on voit apparaître un phénomène nouveau : au lieu de revenir à sa longueur primitive après chaque contraction, le muscle prend peu à peu un raccourcissement permanent comme s'il était contracturé; ce raccourcissement de-

vient très important; il peut disparaître s'il ne dure pas longtemps

et si l'o
La l
hauteur
culaire
est rep
quemen
c'est là
général
faisant
seur et

Fig. 97.
sa co
C, tu

schém
dans

et si l'on se hâte de refroidir le muscle, sinon il devient persistant.

La loi de variation de hauteur de la secousse musculaire avec la température est représentée schématiquement sur la figure 96; c'est là ce que l'on admet généralement. Toutefois, en faisant varier le poids tenseur et la grandeur de l'excitation, il est aisé de voir que cette loi

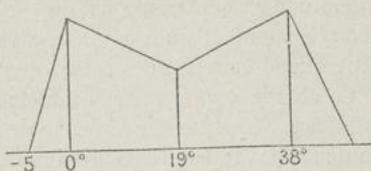


Fig. 96.

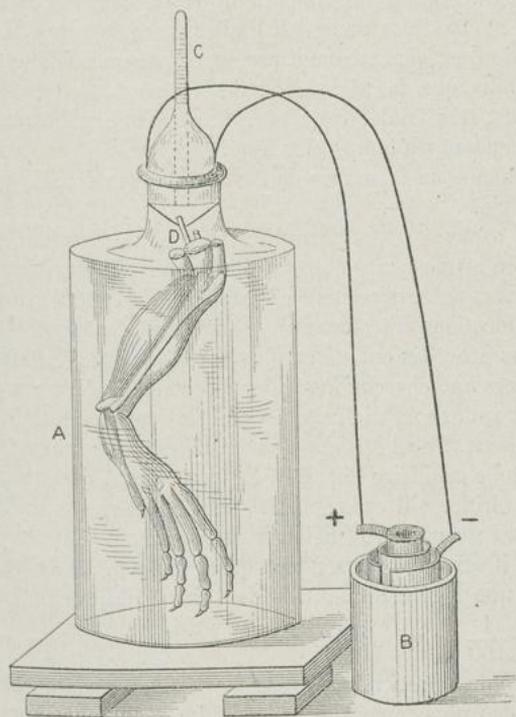


Fig. 97. — Appareil démontrant que le volume du muscle ne change pas pendant sa contraction. — A, flacon rempli d'eau. — B, pile pour exciter le muscle. — C, tube capillaire surmontant le flacon. — D, muscle de grenouille.

schématique est loin d'être toujours respectée, et il n'est pas rare, dans certaines expériences, de trouver des variations de la hau-

teur des secousses très différentes; soit que les maxima et le minimum se déplacent, soit même que le minimum disparaisse complètement et qu'il y ait une variation continue et de même sens quand on passe des basses aux hautes températures.

La charge que le muscle doit soulever en se contractant a une influence très nette sur la forme de la contraction. En général, la hauteur de la secousse diminue lorsque le poids à soulever augmente, cependant une certaine tension du muscle est nécessaire, le muscle ayant un raccourcissement plus grand sous une légère traction que sous une traction nulle; il arrive même parfois que l'augmentation de la hauteur de la secousse avec le poids tenseur se produise dans des limites assez étendues. La période d'ascension est généralement prolongée par un poids tenseur plus fort, tandis que la période de descente est abrégée. Quand la charge est très faible, cette période de relâchement peut se prolonger pendant un temps plus long.

L'influence de la nature de l'excitation sera étudiée en électro-physiologie.

Nous avons vu que lorsqu'un muscle se contracte, il se raccourcit en même temps que ses dimensions transversales augmentent. Divers auteurs se sont préoccupés de la question de savoir si ces modifications entraînent un changement de volume du muscle. Plusieurs procédés ont été employés dans ce but. Certains expérimentateurs ont cherché à vérifier directement s'il y a un changement de volume; pour cela, ils enfermaient un muscle dans un vase contenant de l'eau et ne communiquant avec l'extérieur que par un tube capillaire (fig. 97). En provoquant la contraction, on pouvait vérifier s'il en résultait des déplacements du ménisque dans le tube capillaire. Quelques auteurs nient toute variation de volume; il semblerait cependant qu'au moment de la contraction il y ait une légère diminution de volume qui, en tout cas, n'atteint pas $\frac{1}{100}$ du volume du muscle.

L'étude de l'élasticité du muscle à l'état de repos ou de contraction est des plus importantes; aussi les recherches sur ce point sont-elles très nombreuses. Le mot élasticité pouvant prêter à confusion, il y a intérêt à employer, comme l'a proposé M. Marey, les termes rétractilité et extensibilité. L'étude de l'extensibilité du muscle est compliquée par l'existence de ce que l'on appelle l'extensibilité supplémentaire. En effet, lorsqu'on suspend un poids

à un v
gement
arrive à
cessante
raccour
presque
M. M
allonger
sante, p
tion de
cette ch
tout à f
y a eu
nent.

Cette
représe
chargé
à partir
peu; p
à sa lon

On v
charge
moindr
Toutef
produit
surcha
rupture

L'éla
pendan
devien
fait vo
que ce
ment l

L'al
tion q
poids
sous le
auteur
à la n
Aeb

à un muscle, ce muscle ne prend pas immédiatement un allongement définitif; il faut parfois un temps fort long pour que l'on arrive à une longueur immuable. Il peut même se produire d'incessantes variations de longueur consistant en allongements et raccourcissements successifs qui rendent toute détermination presque impossible.

M. Marey a étudié l'extensibilité du muscle en enregistrant son allongement sous l'influence d'une charge régulièrement croissante, puis son retour à la longueur primitive pendant la diminution de la charge. On constate qu'après la disparition totale de cette charge le muscle n'est pas revenu tout à fait à sa longueur première. Il y a eu un certain allongement permanent.

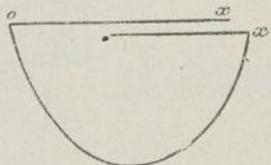


Fig. 98.

Cette variation de longueur est représentée sur la figure 98 où l'on a chargé le muscle d'un poids croissant à partir de o , ce qui l'a allongé peu à peu; puis on a déchargé le muscle jusqu'à x' ; il n'est pas revenu à sa longueur première.

On voit que l'allongement ne croît pas proportionnellement à la charge: pour une même surcharge cet allongement est d'autant moindre que l'allongement est lui-même déjà plus considérable. Toutefois, si l'on dépasse une certaine limite, c'est l'inverse qui se produit, comme on le voit sur la figure 99: pour une même surcharge l'allongement croît alors de plus en plus, jusqu'à la rupture du muscle.

L'élasticité du muscle est encore bien plus difficile à étudier pendant sa contraction que pendant son repos, car la fatigue devient une cause de complication extrême. Weber, le premier, a fait voir que le muscle actif avait une extensibilité plus grande que celle du muscle au repos. La figure 100 fait voir comparative-ment la courbe d'allongement dans les deux cas.

L'allongement d'un muscle étant plus grand pendant sa contraction qu'à l'état de repos, il peut arriver qu'un muscle portant un poids lourd s'allonge au moment de l'excitation. Ce fait, connu sous le nom de paradoxe de Weber, a été contredit par certains auteurs et défendu par d'autres. Ce désaccord tient probablement à la nature des muscles sur lesquels ces auteurs ont opéré.

Aeby a montré, le premier, que si on excite un muscle en un

point, la contraction ne se produit pas simultanément dans tout le muscle. Pour mettre ce fait en évidence, il plaçait deux leviers

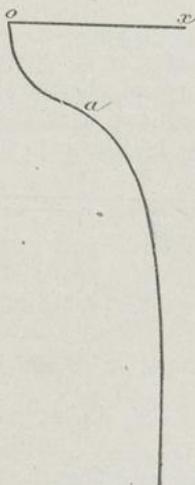


Fig. 99. — Élasticité (d'après M. Marey). Muscle de grenouille. Rotation très lente du cylindre. Influence d'un poids graduellement croissant. La rupture s'est produite sous une charge de 750 g. Quelques instants auparavant, en *a* la limite d'élasticité a été dépassée.

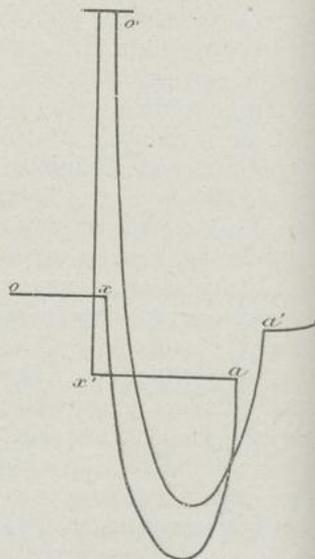


Fig. 100. — Élasticité (d'après M. Marey). Muscle de grenouille. Rotation lente du cylindre. Sous l'influence d'une charge, le muscle non téτανisé donne la courbe *xa*. Le muscle téτανisé donne la courbe *a'a'*, sous l'influence de la même charge. L'excitation est en *x'* et le muscle remonte en *o'* par le fait de sa contraction.

myographiques sur deux points différents d'un muscle long excité à une de ses extrémités. Il arrivait alors que les enregistrements

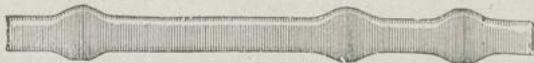


Fig. 101. — Aspect de l'onde musculaire vue au microscope, d'après Aeby.

des deux leviers n'étaient pas concordants; le plus éloigné du point d'excitation, paraissait être en retard sur le plus rapproché. Aeby en concluait qu'une onde de contraction, partie du point excité, se propageait le long du muscle. Une onde musculaire de

ce genre peut être vue au microscope. Il suffit pour cela d'arracher une patte à un hydrophile, d'ouvrir avec soin la partie chitineuse et de placer sur une lame de verre un petit fragment du muscle blanc qui y est contenu. On ajoute une goutte du liquide qui coule par la blessure faite à l'animal et on couvre avec une lamelle. En examinant cette préparation au microscope on aperçoit facilement des ondes

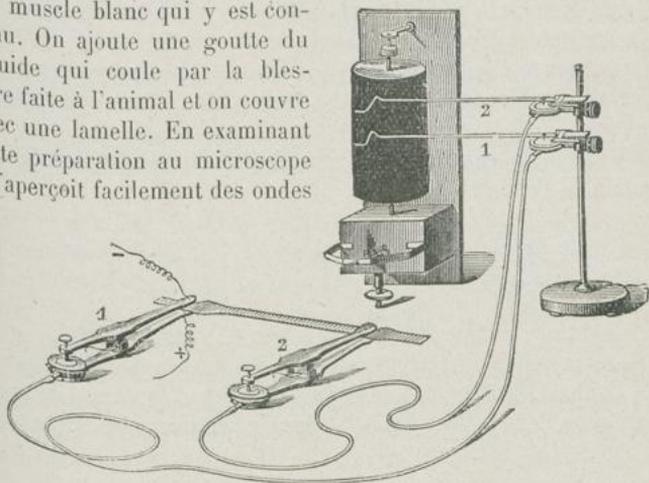


Fig. 102. — Passages de l'onde musculaire explorés au moyen de deux pinces myographiques.

qui se produisent spontanément et qui parcourent les fibres musculaires.

M. Marey et divers auteurs ont repris les expériences de Aeby

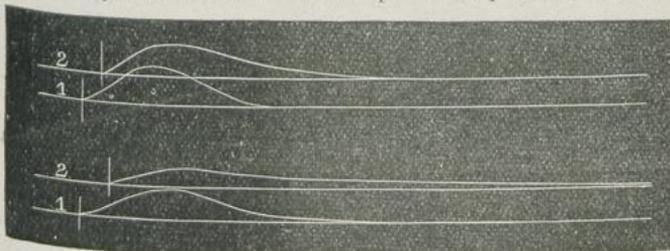


Fig. 103. — Tracés du passage de l'onde musculaire.

et ont constaté l'existence de l'onde dont ils ont même pu mesurer la vitesse de propagation.

M. Marey se sert dans ce but de deux pinces myographiques à transmission installées comme le représente la figure 102. Le muscle est excité près de l'une des pinces

La figure 103 représente les tracés obtenus sur le lapin. Le tracé inférieur correspond à un muscle refroidi par la glace; on voit que dans ce cas l'onde se propage plus lentement. Si l'on excite le muscle par l'intermédiaire du nerf, on ne constate pas d'onde, toutes les parties entrent simultanément en activité. Aussi, pour mettre l'onde en évidence, faut-il opérer sur un muscle curarisé ou bien exciter la partie la plus éloignée du point d'entrée du nerf.

Voici quelques chiffres donnant une idée de la vitesse de propagation de l'onde :

Grenouille	3 à 4 mètres par seconde.
Lapin	4 à 5 —
Homme.	10 à 13 —

Ce dernier chiffre est pris sur l'homme vivant.

Les premiers ont été obtenus sur des muscles séparés du corps de l'animal. Le froid et la fatigue diminuent la vitesse de propagation de l'onde. Il en est de même de certains poisons.

X

STATION ET LOCOMOTION DE L'HOMME

Dans tous les problèmes d'équilibre et de mouvement des corps, le centre de gravité joue un rôle de premier ordre. Il est donc indispensable de connaître le centre de gravité du corps humain pour toutes les questions concernant la station, la marche, etc.

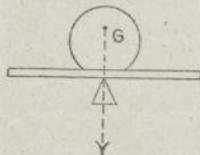


Fig. 104.

Cette détermination peut se faire de diverses façons.

Si l'on place une planche horizontale sur un couteau de balance à arête supérieure, on pourra trouver une position où cette planche a une égale tendance à basculer à droite ou à gauche. Plaçons maintenant sur la planche un corps, il se trouvera aussi pour ce corps une position sur la planche où la tendance à basculer également à droite ou à gauche est conservée (fig. 104). A ce moment le centre de gravité G est au-dessus de l'arête du couteau. En répétant la même expérience pour une série de positions du

corps G, on aura sur ce corps une série de lignes qui, par leur intersection, donnent la position du centre de gravité. Il suffit pour cela de faire l'opération dans trois positions différentes.

C'est le procédé que l'on peut employer pour déterminer la position du centre de gravité du corps humain. On couche d'abord le sujet horizontalement sur la planche, perpendiculairement à l'arête du couteau, on obtient ainsi la hauteur à laquelle se trouve le centre de gravité dans le corps.

On fait ensuite une deuxième expérience, le sujet étant debout et vu de profil. Il est en général inutile d'en faire une troisième, car on sait que le centre de gravité est dans le plan de symétrie du corps, à moins toutefois que l'on ne recherche cette position du centre de gravité pour une attitude asymétrique, par exemple pour un sujet fendu à l'escrime, ou un individu portant un fardeau sur une épaule, etc.

La position du centre de gravité varie quand on vient à déplacer les membres, c'est par des mouvements de ce genre que les acrobates arrivent à se tenir en équilibre sur une perche horizontale ou même une corde, en ramenant toujours par un mouvement approprié le centre de gravité au-dessus du point d'appui.

Il faut donc, dans la détermination du centre de gravité par le procédé que nous venons d'indiquer, bien spécifier la position dans laquelle se trouvait le sujet. Le mieux est d'en prendre une photographie. C'est ainsi qu'a opéré P. Richer entre autres.

Dans la station debout, le centre de gravité est à la hauteur de la partie supérieure de la deuxième vertèbre lombaire, et sa projection horizontale tombe sur une ligne transversale passant en avant de l'apophyse du cinquième métatarsien.

Lorsqu'on déplace un membre, aussitôt le centre de gravité se déplace aussi dans le corps, et il faudrait déterminer sa position pour chaque attitude. Au lieu de faire cela expérimentalement, ce qui dans certains cas serait presque impossible, on peut déterminer le centre de gravité de chaque segment du corps ou des membres, et, dans une position déterminée, on trouvera par une composition de forces la position du centre de gravité de l'ensemble.

Dans ce but, pour déterminer les centres de gravité des diverses parties du corps, W. Braune et O. Fischer ont congelé un cadavre, l'ont découpé à la scie et ont recherché le poids et la position des centres de gravité des morceaux ainsi obtenus.

Station.

Pour qu'un homme puisse se tenir debout dans la position dite du soldat sans arme, les divers segments du corps doivent être en équilibre les uns au-dessus des autres.

Différentes théories ont été données pour que cette condition se trouve réalisée.

Pour qu'un corps se trouve en équilibre sur un support, nous savons que la verticale passant par son centre de gravité doit passer par le point où il touche le support, ou, s'il le touche par divers points, en dedans du polygone formé en joignant les uns aux autres ces divers points de contact. Cette condition ne se trouve généralement pas réalisée dans le corps humain.

Prenons, par exemple, la pièce supérieure, le crâne, qui repose par les condyles sur la dernière vertèbre, l'atlas. La verticale du centre de gravité passe sensiblement en avant de la ligne transversale joignant les deux condyles. Il en résulte que la tête ne se maintient pas en équilibre par elle-même, elle a une tendance à tomber en avant. Il est facile de le constater sur une personne qui dort assise; si elle n'a pas au préalable fortement renversé

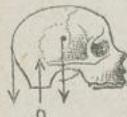


Fig. 105.

la tête en arrière, cette tête aura une tendance à tomber en avant. A l'état de veille les muscles de la nuque interviennent alors, et produisent par rapport au point de rotation O un moment annulant l'effet du poids. Il en est de même dans les autres articulations, et ce moment compensateur est produit, suivant les auteurs, par les ligaments, la tonicité des muscles, ou par leur contraction active. Il ne faut pas être absolu, ces divers facteurs peuvent intervenir à la fois, et leur influence varie d'ailleurs suivant l'articulation examinée et la position de la station.

Si nous examinons les diverses vertèbres, nous constatons qu'elles conservent leur position les unes au-dessus des autres par le même mécanisme que la tête. Ce sont ici les muscles du dos qui interviennent, au moins pour la partie cervicale et dorsale. Dans la région lombaire la ligne de gravité passe en arrière (fig. 106) des vertèbres et ce sont alors les muscles de l'abdomen qui forment le moment compensateur.

Le tronc est en équilibre sur la tête des deux fémurs, c'est comme s'il était posé sur un axe horizontal passant par ces deux

lètes.
horizon
partie
former
teur. (C
fascia
Bertin
Les
sent su
centre
du con
par les
du gen
ce son
Ce c
porte à
la lign
à la lig
La f
représ
zontale
de la
station
à gauc
Si l'
sur un
gauche
épaule
vers la
De

une ép
antéro
Lors
on voit

têtes. La verticale du centre de gravité passe en arrière de cette horizontale, ce sont alors les muscles qui vont de la cuisse à la partie antérieure du bassin qui forment le moment compensateur. (Psoas iliaque, tenseur du fascia lata et surtout ligament de Bertin; fig. 107.)

Les condyles du fémur reposent sur les tibias, la verticale du centre de gravité passe en avant du contact et l'équilibre est assuré par les jumeaux et les ligaments du genou. Enfin, pour le pied, ce sont les jumeaux et le soléaire.

Ce que je viens de dire se rapporte à la position symétrique où la ligne des épaules est parallèle à la ligne des hanches (fig. 108).

La figure 108 et la figure 109 représentent la projection horizontale de la ligne des épaules et de la ligne des hanches dans la station droite et la station hanchée à gauche.

Si l'on porte le poids du corps sur une jambe, par exemple la gauche, il y a une rotation double en sens inverse de la ligne des épaules et de la ligne des hanches, et le centre de gravité se porte vers la jambe gauche (fig. 109).

De même si l'on porte un poids, seau d'eau, fusil, etc., sur

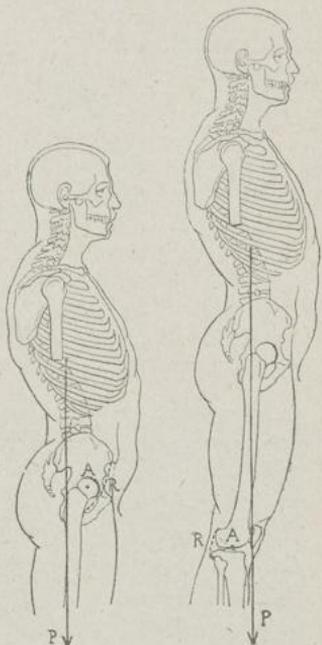


Fig. 106.

Fig. 107.

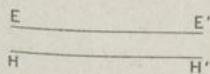


Fig. 108. — Station droite.



Fig. 109. — Station hanchée à gauche.

une épaule, il n'y a plus symétrie par rapport à un plan vertical antéro-postérieur.

Lorsqu'une personne veut se soulever sur la pointe des pieds, on voit, d'après ce qui a été dit sur le point où tombe la verticale

du centre de gravité, qu'il est nécessaire qu'elle se penche préalablement en avant. En effet, si elle se contentait de contracter les muscles de ses mollets, elle se soulèverait bien pendant un instant, mais la verticale du centre de gravité tombant en arrière des points où la pointe des pieds touche le sol, il y aurait rotation en arrière et chute du corps. L'expérience est facile à faire; si dans la station debout on se contente de contracter les muscles du mollet on tombe en arrière. On peut au contraire rester en équilibre si préalablement on penche le corps en avant de façon à faire tomber la verticale du centre de gravité aux points où les pieds toucheront le sol une fois le corps soulevé.

Marche.

L'étude de la marche, de la course à diverses allures, du saut, etc., comprend un grand nombre de problèmes dont les principaux sont de déterminer le mouvement des diverses parties du corps dans l'espace, la force déployée par les muscles et l'action exercée par les pieds contre le sol.

Pendant longtemps, conformément aux théories des frères

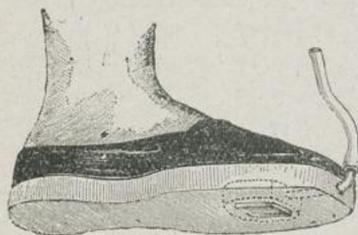


Fig. 110.

Weber, on considérait que pendant la marche le corps reposait alternativement sur la jambe droite et la jambe gauche servant de point d'appui, la jambe mobile oscillant comme un pendule pour quitter le sol en arrière et se porter en avant. La jambe mobile était donc à proprement parler passive. Aujourd'hui, grâce surtout aux travaux de Marey, on sait qu'il n'en est rien, et qu'à chaque pas, la jambe qui va quitter le sol exerce une pression contre ce sol pour pousser le corps en avant.

Pour montrer cela, Marey munissait le sujet soumis à l'expérience d'une chaussure exploratrice à semelle élastique contenant une petite chambre à air (fig. 110) pouvant être comprimée au moment de l'appui sur le sol. Cette petite chambre à air était mise en communication par un tube en caoutchouc avec un tambour à levier inscrivant, sur un cylindre enfumé, toutes les variations

de compression et par suite toutes les variations de la force avec laquelle le pied pressait contre le sol. C'est ainsi que Marey put vérifier que la pression augmente à la fin de l'appui; c'est-à-dire qu'avant de quitter le sol pour se porter en avant, le pied exerce

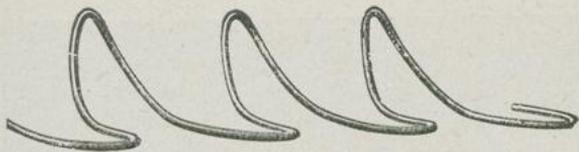


Fig. 111

contre lui une poussée plus énergique que dans le simple appui. Dans une série de travaux remarquables, W. Braune et O. Fischer ont commencé à étudier l'action des différents muscles aux divers temps de la marche, mais l'exposé de ces recherches réservées

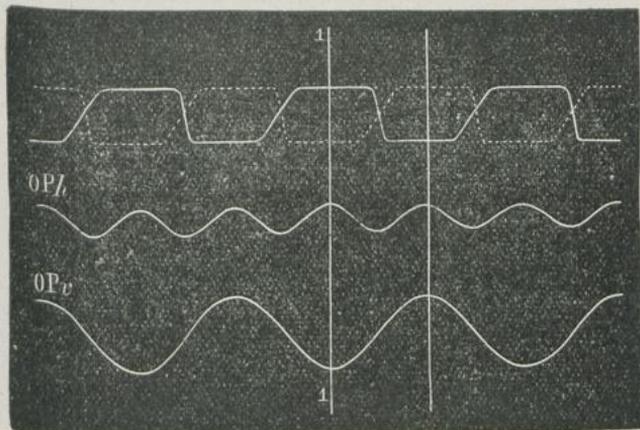


Fig. 112.

aux spécialistes nécessiterait, pour être compréhensible, de trop grands développements.

Pendant la marche, le centre de gravité subit une série d'oscillations qui se répètent périodiquement à chaque pas. Pour étudier graphiquement ces oscillations, ne pouvant opérer sur le centre de gravité qui se trouve à l'intérieur du corps, Marey détermina le mouvement du pubis. A cet effet le sujet marchait en se tenant à l'extrémité du bras d'un manège; le pubis était relié à un sys-

tème de tambours à levier qui en transmettaient les mouvements à un enregistreur placé au centre du manège. On reconnaît ainsi que le pubis oscille de haut en bas et de droite à gauche. L'ensemble de la courbe qu'il décrit peut être représenté (fig. 111)

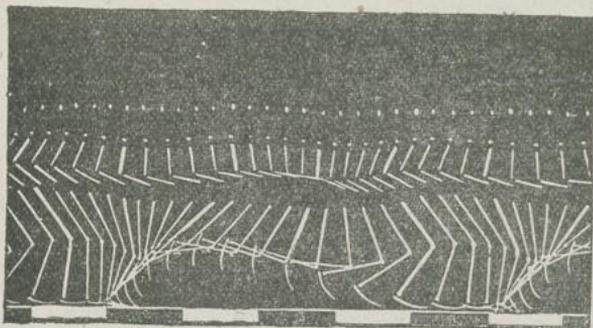


Fig. 113.

au moyen d'un fil de fer faisant une série de sinuosités à droite et à gauche d'une ligne moyenne appliquée au fond d'une rainure cylindrique à concavité supérieure. Au moment où le corps repose également sur les deux pieds, ce que l'on nomme le double appui,

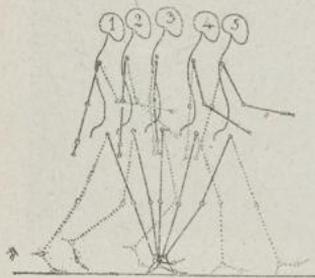


Fig. 114.

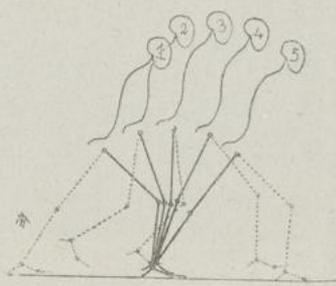


Fig. 115.

le centre de gravité est sur la ligne moyenne et le plus bas possible. Le pied arrière se soulevant pour se porter en avant, le centre de gravité, ou le pubis, s'élèvent et se déplacent latéralement du côté de l'appui, pour redescendre ensuite, vers la ligne moyenne, et l'atteindre au moment du nouveau double appui. La figure 112 représente les oscillations horizontales et verticales du pubis dans ce mouvement, on voit que les premières sont en

nombre double des secondes, ce que l'on comprend aisément en se reportant à la figure précédente.

Dans ces dernières années l'emploi de la méthode graphique

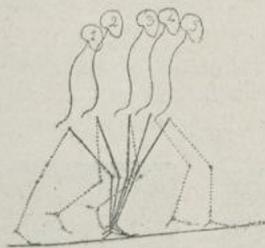


Fig. 116.

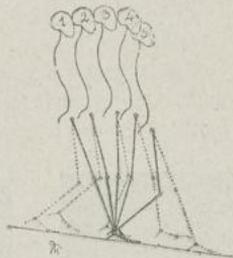


Fig. 117.



Fig. 118.



Fig. 119.

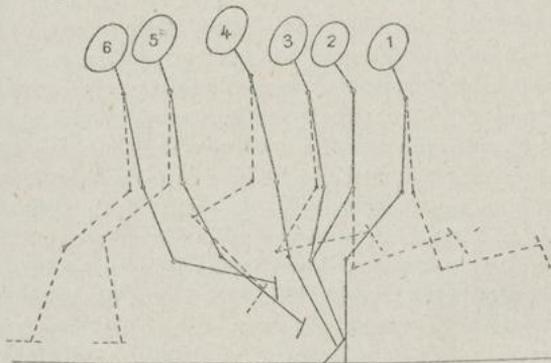


Fig. 120.

pour l'étude de la marche a été remplacé par la photographie instantanée en séries. Ces séries de photographies aux divers temps

de la marche ou de la course peuvent se faire sur plaque fixe ou sur plaque mobile, comme il sera indiqué au chapitre relatif à la chronophotographie. Sur plaque fixe on obtient toute une série d'images sur la même plaque, on risque donc des superpositions plus ou moins considérables suivant le déplacement du sujet et le nombre des images. Afin d'éviter ces superpositions on place le sujet sur fond noir, on l'habille tout en noir, en ne marquant avec des lignes blanches que les points ou lignes dont

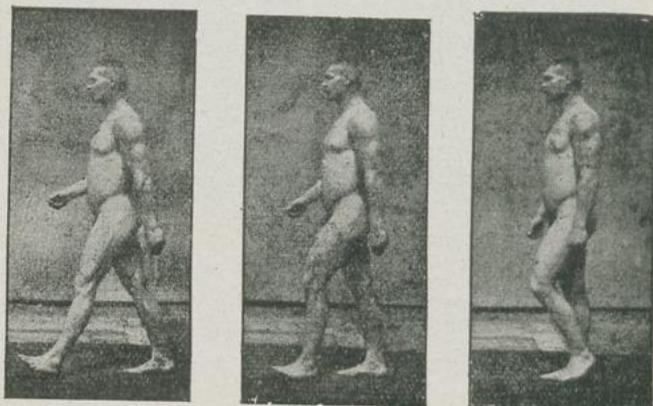


Fig. 121.

on désire fixer la position sur l'épreuve. On a alors une épreuve analogue à celle de la figure 113 où l'on peut suivre le mouvement des divers segments du corps. Dans les photographies sur plaque mobile on a au contraire les images complètement dissociées, chaque épreuve est à part, mais dans ce cas il faut avoir des repères sur chacune d'elles et faire un travail considérable de reconstitution pour avoir la loi du mouvement. Cette seconde méthode est surtout bonne pour étudier les attitudes et les mouvements des muscles aux divers temps de la locomotion.

Les figures 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, montrent comment les différents segments du corps se déplacent dans la marche à diverses allures et dans la course, ce sont des résultats de chronophotographies sur plaque fixe.

La figure 121 est un exemple de photographies dissociées sur lesquelles on peut bien voir le relief des muscles, leur forme et la véritable attitude des membres aux divers temps de la marche.

Fluid
leurs m
une posi
Les m
par rapp
surface
gaz à l'
molécul
liquide,
le vase
pient, m
conserv

Press
fluide q
leur. C
et si l'o
une ou
ouvertu
soit plu
cas c'es
du fluid
du vase
petite s
d'un pe
la part
La p
que la
en un
une pr

XI

PRINCIPES GÉNÉRAUX D'HYDROSTATIQUE
ET D'HYDRODYNAMIQUE*Hydrostatique.*

Fluides. — Les fluides se distinguent des solides en ce que leurs molécules n'occupent pas, les unes par rapport aux autres, une position fixe. Ces fluides sont les gaz et les liquides.

Les molécules des fluides étant parfaitement mobiles les unes par rapport aux autres, ces corps se moulent exactement sur la surface interne des vases qui les contiennent. Lorsqu'on place un gaz à l'intérieur d'un vase, il en occupe toute la capacité; ses molécules s'écartent les unes des autres en conséquence. Un liquide, au contraire, conserve un volume constant quel que soit le vase qui le contienne. Sa forme changera avec celle du récipient, mais ses molécules, tout en glissant les unes sur les autres, conserveront la même distance réciproque.

Pression. — Considérons un vase complètement rempli d'un fluide quelconque, que nous supposons d'abord dénué de pesanteur. Ce fluide exerce sur les parois du vase une certaine pression, et si l'on venait à découper dans la paroi de ce vase une ouverture, le fluide s'échapperait par cette ouverture, à moins que la pression extérieure ne soit plus grande que la pression intérieure, auquel cas c'est l'inverse qui se passerait. Cette pression du fluide ne s'exerce pas seulement sur la paroi du vase; en un point quelconque du milieu, une petite surface idéale, ou, si on veut la matérialiser, la surface d'un petit morceau de papier tel que AD, subira une pression de la part du fluide.

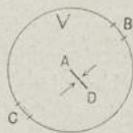


Fig. 122.

La propriété fondamentale des fluides, énoncée par Pascal, est que la pression se transmet intégralement. Cela veut dire que si en un point quelconque du fluide une surface donnée supporte une pression déterminée, en tout autre point la même surface

supportera la même pression. Supposons, par exemple, que le vase V (fig. 122) contienne un fluide non pesant, et que en B un centimètre carré subisse, de la part du fluide, une pression de 1 kilogramme; on peut affirmer qu'en une région quelconque, C, de la paroi, un centimètre carré supportera également une pression de 1 kilogramme. Si au lieu de prendre une surface de paroi, on prenait 1 cm^2 en AD, il supporterait encore cette même pression de 1 kg. D'une façon générale, dans ce vase, 1 cm^2 , quelles que soient sa position et son orientation, supporte une pression de 1 kg. Cette pression est normale à la surface.

Ce principe établi pour les fluides non pesants subsiste pour les fluides pesants, mais il s'y ajoute un autre effet.

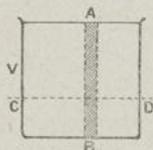


Fig. 123.

Considérons un vase V contenant un fluide pesant le remplissant complètement (fig. 123).

Un centimètre carré de paroi A, à la partie supérieure du vase, sera soumis à la pression p qui se transmettra intégralement au centimètre carré placé en B. Mais, en plus, B supportera le poids de la colonne de fluide qui se trouve au-dessus de lui. Par conséquent, B supportera une pression d'autant plus grande, par rapport à celle que supporte A, que la hauteur AB sera elle-même plus grande.

Dans ce cas, la pression est encore normale à la surface.

Les petites surfaces A et B n'ont pas besoin d'être superposées pour que cette règle s'applique. En effet, toutes les petites surfaces égales à 1 cm^2 , et se trouvant dans un même plan horizontal CD, supportent la même pression que 1 cm^2 en A, plus le poids d'une colonne de fluide ayant pour base 1 cm^2 , et pour hauteur la distance verticale entre CD et A. Enfin, la pression sur 1 cm^2 est indépendante de l'orientation de ce centimètre.

Ainsi, 1 cm^2 placé en C supporte la même pression, qu'il soit horizontal, vertical ou oblique. Une surface telle que CD, où chaque centimètre supporte la même pression, s'appelle une surface de niveau.

Principe d'Archimède. — Lorsqu'un corps C (fig. 124) se trouve plongé dans un fluide, toute sa surface se trouve soumise à une certaine pression. Si le fluide est pesant, la pression sur chaque centimètre carré sera plus grande à la partie inférieure du corps qu'à la partie supérieure. Il en résultera que toutes les

pressions qui tendront à élever le corps seront supérieures à celles qui tendront à l'abaisser. La résultante de l'ensemble de toutes ces pressions sera dirigée de bas en haut.

On démontre expérimentalement et théoriquement que cette résultante, ou poussée du fluide sur le corps, est égale au poids du fluide déplacé par le corps.

Il peut arriver :

1° Ou bien que le corps ait exactement le même poids que le volume de fluide qu'il déplace. Le corps restera alors en équilibre dans ce fluide, il ne montera ni ne descendra.

2° Ou bien que le corps ait un poids supérieur à celui du volume de fluide déplacé, et il tombera comme le font la plupart des corps dans l'air ou comme le fait une pierre dans l'eau.

3° Ou bien, enfin, que le corps ait un poids inférieur à celui du volume du fluide déplacé, la poussée sera supérieure à l'effet de l'attraction terrestre. Le corps s'élèvera comme un ballon dans l'air ou comme un bouchon dans l'eau.

Ce principe d'Archimède trouve son application dans un grand nombre de cas. En particulier lorsqu'on veut déterminer le volume d'un corps, il suffit de le suspendre sous le plateau d'une balance, et de faire l'équilibre. On plonge ensuite le corps dans l'eau (fig. 125); il en résulte une poussée de bas en haut. On rétablit l'équilibre en ajoutant des poids dans le plateau du côté du corps. Ces poids ajoutés donnent le poids d'eau déplacée par le corps et, par suite, son volume.

Lorsqu'un corps plongé dans un fluide, un liquide par exemple, subit ainsi une pression de bas en haut, inversement les parois du vase subissent une pression de haut en bas. Cela résulte du principe de Newton, sur l'action et la réaction. Supposons, par exemple, qu'un vase V (fig. 125) contienne de l'eau et un certain corps C. Ce corps C subit, comme nous l'avons dit, une poussée de bas en haut. Inversement les parois du vase subissent une poussée de haut en bas, égale au poids de l'eau contenue dans le vase, plus le poids d'eau qui occuperait le volume du corps.

Lorsqu'un corps C repose sur un plan, par exemple sur le fond d'un vase V, tout le poids du corps se transmet au plan par leur point de contact. Il peut arriver alors que sous cette pression le

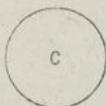


Fig. 124.

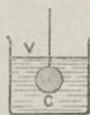


Fig. 125.

corps C se déforme et se détériore en ce point de contact. Si l'on remplit le vase d'eau par exemple, le corps subira une poussée de

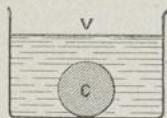


Fig. 126.

bas en haut et la pression qu'il exerce en son contact avec le plan sera diminuée d'autant; si sa densité n'est que très peu supérieure à celle du liquide dans lequel il est plongé, il flottera et ne subira plus qu'une faible pression directe en un de ses points par contact avec le vase qui le contient.

La pression du liquide sera répartie sur toute sa surface et ne causera aucune déformation sensible. C'est ainsi que certains organes délicats, comme le cerveau, sont soutenus et protégés, dans la boîte osseuse qui les renferme par le liquide interposé entre eux et la paroi. Ce liquide joue finalement le rôle d'un véritable matelas.

Hydrodynamique.

Considérons un liquide en mouvement.

La variation de pression d'un point à un autre ne suit plus la loi simple indiquée pour les liquides en équilibre.

De plus, la pression exercée par le liquide sur une paroi solide n'est plus normale à la paroi. Ceci n'aurait lieu que si les molécules liquides glissaient sur ces parois sans aucun frottement. En réalité, il n'en est pas ainsi; lorsqu'un liquide se déplace sur une paroi solide, il y a entre ces deux corps un frottement analogue à celui que nous avons étudié dans le mouvement de deux corps solides au contact; en nous reportant au frottement des solides, nous pouvons aisément concevoir que l'action exercée par le liquide mobile sur la paroi fixe n'est plus normale à cette paroi. La pression du liquide sur la paroi a une inclinaison variable suivant la grandeur du frottement; elle dépend de la vitesse du courant, de la nature liquide et de la paroi.

Un autre élément influe encore considérablement sur la transmission des pressions dans un liquide en mouvement: c'est ce que l'on appelle la viscosité du liquide, qui sera plus spécialement étudiée plus loin. Nous avons, en effet, supposé dans la définition des fluides que leurs molécules roulent les unes sur les autres sans éprouver aucune résistance. Mais cette définition correspond à un état idéal, à ce que l'on peut appeler un fluide parfait. Les liquides que nous connaissons sont loin de se trouver dans ce cas.

Ils possèdent tous ce que l'on appelle un frottement intérieur ; et lorsque les molécules d'un pareil liquide sont en mouvement les unes par rapport aux autres, elles éprouvent dans leurs déplacements une résistance qui est cause d'une perturbation dans la transmission des pressions.

La différence de pression entre deux points d'un liquide, cause du mouvement de ce liquide, est ce que l'on appelle la charge. Considérons un tuyau d'écoulement d'eau. A l'une de ses extrémités la pression sera par exemple de trois atmosphères, à l'autre extrémité elle sera d'une atmosphère, si le tuyau débouche dans l'air. On dira que la charge entre les deux extrémités du tuyau est de deux atmosphères. C'est sous l'influence de cette charge que se produira l'écoulement.

Si l'on désire connaître la pression en un point d'un liquide, il suffit de placer en ce point l'extrémité inférieure d'un tube de verre ouvert aux deux bouts. Le liquide pénètre dans le tube et monte à une hauteur qui donne la pression au point considéré. Un pareil tube se nomme *tube piézométrique*.

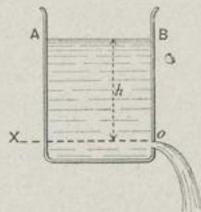


Fig. 127.

Quand un liquide s'écoule à travers l'orifice O d'un vase, les parois étant très minces au niveau de cet orifice, de façon à éviter le frottement des molécules liquides contre les parois solides, la vitesse à la sortie est donnée par la relation $V = \sqrt{2gh}$, h étant la hauteur du niveau au-dessus de l'orifice (fig. 127). Cela revient à dire que les molécules liquides ont la même vitesse que si elles tombaient en chute libre de la hauteur h .

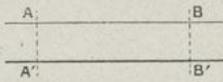


Fig. 128.

Si un liquide s'écoule à travers un tuyau cylindrique (fig. 128), il y a d'abord lieu de remarquer que la vitesse du liquide doit être la même en tous les points du parcours, car le liquide est pratiquement incompressible. Dans le même temps la même quantité doit passer à travers la surface AA' et à travers la surface BB' . Ces deux surfaces étant égales, la vitesse v est la même. Si, au contraire, le tuyau est de section (fig. 129) brusquement ou graduellement variable, la même quantité de liquide doit encore passer à travers AA' et BB' , mais évidemment dans ce cas la vitesse est d'autant plus faible que la surface de section à traverser est plus grande.

Voyons maintenant ce qui se passe pour les pressions. Dans un tuyau cylindrique de section uniforme (fig. 130) le liquide coule des parties à plus haute pression A, vers les parties à basse pression B. L'expérience prouve qu'entre ces deux points la baisse de



Fig. 129.

pression se répartit uniformément, c'est-à-dire que les niveaux dans les tubes piézométriques se trouveraient tous sur une ligne droite comme l'indique la figure. Si, à partir d'un certain point, la section du tube venait à diminuer (fig. 131), on verrait la chute de pression se faire plus rapidement dans la partie étroite du tube que dans la partie large. Si, au contraire (fig. 132), le calibre du tube augmentait, la chute de pression deviendrait plus lente. Si enfin en une région B d'un tube, pour une raison quelconque, il se produisait une augmentation de résistance (fig. 133), aussitôt cette augmentation se traduirait par cette chute de pression après laquelle la diminution de hauteur des niveaux piézométriques reprendrait la même allure qu'avant, si le tube a même calibre. La quantité de liquide débité

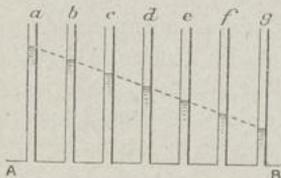


Fig. 130.

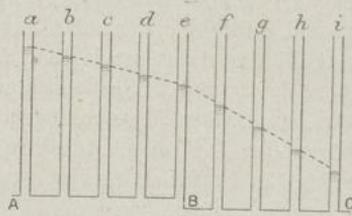


Fig. 131.

par un tuyau varie suivant sa section, sa longueur, la nature de ses parois et la pression. La loi qui régit ce débit est assez compliquée; il nous suffira de dire que la quantité de liquide qui s'écoule, dans le même temps, à travers un même tuyau, est proportionnelle à la racine carrée de la différence de pression qui s'exerce à ses deux extrémités, autrement dit pour doubler l'écoulement il faut quadrupler la pression.

Ceci ne s'applique qu'aux tuyaux à grand diamètre; la loi d'écoulement des liquides dans les conduits capillaires est totalement différente de la précédente. Nous devons à Poiseuille une étude très

complète
capillaires
pression
tubes la

Puis
raison in
loi se v
certaine
diamètre



gueur;
longueu
Enfin
quatrième
double
81 fois
On p
lares p

K étant
tempér

Poise
des tul
une sé
couche
Il en ré
il se de
tance o
ment i

complète de cette question. Il fit voir que dans un même tube capillaire la quantité de liquide écoulé est proportionnelle à la pression et non à la racine carrée de la pression, comme pour les tubes larges :

Puis il montra que le débit sous une même pression est en raison inverse de la longueur du tube. Il faut, pour que cette loi se vérifie, que la longueur ne tombe pas au-dessous d'une certaine limite, variable avec le diamètre du tube. Ainsi, pour un diamètre de 0 mm. 4, il suffit de quelques millimètres de lon-

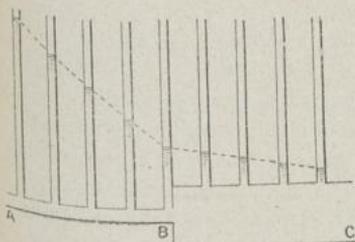


Fig. 132.

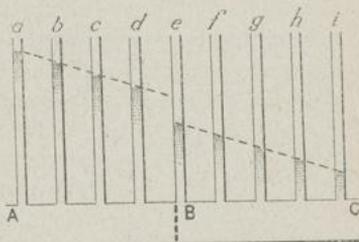


Fig. 133.

gueur; pour 0 mm. 5 de diamètre, il faut au moins 150 mm. de longueur.

Enfin, dans les mêmes conditions, le débit augmente avec la quatrième puissance des diamètres. C'est-à-dire que si le diamètre double il s'écoule 16 fois plus de liquide, s'il triple il s'en écoule 81 fois plus.

On peut donc exprimer la loi d'écoulement dans les tubes capillaires par la formule :

$$Q = K \frac{PD^4}{L},$$

K étant un coefficient qui dépend de la nature du liquide et de la température.

Poiseuille a démontré aussi qu'il existe au voisinage de la paroi des tubes capillaires une couche liquide immobile. Duclaux, par une série d'expériences ingénieuses, a vérifié l'existence de cette couche et a pu la mesurer pour un certain nombre de liquides. Il en résulte que lorsqu'un liquide s'écoule dans un tube capillaire, il se déplace sur un corps de même nature que lui-même. La résistance qu'il éprouve tient donc à ce que nous avons appelé le frottement intérieur du liquide ou à la viscosité, et l'écoulement des

divers liquides dans les tubes capillaires permet, comme on le verra plus loin, de mesurer cette viscosité.

Canalisation ramifiée. — Lorsque au lieu d'un tuyau unique on a une canalisation ramifiée, tous les problèmes relatifs à l'écoulement des liquides se compliquent beaucoup.

Il est impossible de donner des règles générales; dans chaque cas il faut étudier par tronçons ce qui se passe entre deux embranchements.

Régime non permanent. — Dans tout ce qui précède, nous avons supposé que le régime permanent était établi, c'est-à-dire qu'en un point quelconque le liquide conservait toujours la même vitesse.



Fig. 134.

Souvent il n'en est pas ainsi. Cela arrivera, par exemple, quand au lieu de laisser l'eau d'un bassin à niveau constant s'écouler librement dans une conduite, ce liquide sera chassé dans les tuyaux par une pompe. Dans bien des cas l'effet de cette pompe ne sera pas de lancer un courant continu, mais de produire une série d'ondes. A l'origine de la conduite, la vitesse de l'eau, d'abord nulle, ira croissant jusqu'à un maximum, puis retombera à zéro, pour repasser périodiquement par les mêmes états.

Ces conditions sont encore mal étudiées, mais l'on sait qu'il se produit dans ce cas de grandes pertes de charge. Pour réduire ces pertes de charge, il faut donner aux conduites une certaine élasticité. On peut, pour arriver à ce résultat, ou bien se servir de conduites à paroi élastique, ou bien placer à l'origine de ces conduites un amortisseur à air. Supposons, par exemple, que sur une conduite BC (fig. 134) parcourue par un courant variable de gauche à droite, on place une cloche A contenant de l'air, cela n'empêche pas le liquide de passer. A chaque augmentation de pression venant par B, l'air A sera comprimé, il ne se produira pas d'onde brusque du côté de C. Le liquide ne s'écoulera que peu à peu vers la droite, et, malgré les variations de pression venant par B, le courant sera sensiblement continu en C. On peut rendre cette continuité aussi grande qu'on le désirera en prenant A assez grand. Dans ces conditions, les pertes de charge de la conduite sont beaucoup diminuées, et l'on constate que la

même pompe donne un débit plus grand. Lorsque dans le cas d'un courant intermittent il n'y a pas à l'origine de cette conduite de réservoir élastique, l'atténuation des oscillations peut être atteinte par l'élasticité des parois des tuyaux, ainsi qu'on l'a vu à propos de l'élasticité. On verra l'intérêt de ces faits, à propos de l'étude de la circulation du sang.

Travail nécessaire pour produire un écoulement déterminé. — Considérons une conduite AB, A étant l'ouverture par laquelle l'eau entre dans la conduite sous une pression P, v étant la vitesse d'écoulement.

Tout se passe comme si en A il y avait un piston de section exactement égale à celle du tuyau et s'avancant avec une vitesse v . Quelle est la quantité de travail dépensée pour faire avancer le piston? La pression par unité de surface étant p , la pression totale sur le piston pS , S étant la surface de ce piston. Comme en une seconde il parcourt un chemin v , le travail dépensé est pSv . Mais Sv est la quantité Q d'eau débitée par seconde; donc le travail est représenté par pQ .

C'est-à-dire que le travail nécessaire pour chasser un liquide dans une conduite est égal au produit de la quantité de liquide débitée par la pression à l'origine de la conduite.

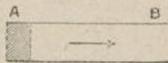


Fig. 135.

XII

CIRCULATION

Révolution cardiaque.

Tous les vertébrés, sauf l'amphioxus, ont un cœur. Chez les vertébrés inférieurs, il ne se compose que d'une oreillette et d'un ventricule; puis on voit d'abord l'oreillette se diviser, plus tard le ventricule. Chez les oiseaux et les mammifères il y a une séparation complète en ce que l'on nomme le cœur droit, contenant le sang veineux et composé d'une oreillette et d'un ventricule, et le cœur gauche, contenant le sang artériel et composé aussi d'une oreillette et d'un ventricule.

Dans les deux cœurs le sang afflue par les veines et est chassé par les artères. Sauf des cas exceptionnels les deux oreillettes se

contractent simultanément donnant la systole auriculaire, puis les deux ventricules se contractent également simultanément donnant la systole ventriculaire.

Si l'on observe ce qui se passe pendant une révolution du cœur, c'est-à-dire entre deux retours au même état, on constate d'abord une période de repos complet, le cœur est en diastole, les oreillettes se remplissent de sang. A un moment donné les oreillettes chassent une partie de leur contenu dans les ventricules à travers les orifices auriculo-ventriculaires; très rapidement après cette systole auriculaire, se produit la systole ventriculaire chassant le sang dans l'aorte et l'artère pulmonaire. Des valvules placées aux orifices auriculo-ventriculaires, valvule mitrale à gauche et tricuspide à droite, empêchent pendant ce temps le sang de refluer dans les ventricules pendant la diastole par suite des valvules aortiques et pulmonaires.

Le cœur fonctionne comme une pompe munie de soupapes pour puiser le sang dans les veines et le refouler dans les artères.

La fréquence des battements est très variable suivant les espèces animales, nous verrons à propos de la chaleur que, chez les mammifères, cette fréquence est étroitement liée à la grandeur des animaux.

Chez un même animal diverses conditions peuvent aussi faire varier cette fréquence, le travail musculaire, la température, la pression, d'autres facteurs parfois difficiles à préciser. Dans des conditions en apparence identiques, il y a des variations individuelles notables pour une même espèce. Ainsi, chez l'homme sain, on a vu la fréquence par minute tomber à 20 et monter à 120, les chiffres moyens sont 70 pour l'homme et 80 pour la femme. Chez les jeunes enfants elle peut s'élever normalement jusqu'à 100.

Pendant une révolution du cœur la durée des systoles reste sensiblement constante d'un individu à l'autre. On peut prendre comme chiffres simples faciles à retenir : 0",3 pour le grand repos, 0",1, pour la systole auriculaire, 0",4 pour le petit repos et 0",3 pour la systole ventriculaire. Ceci donnerait 60 battements par minute, les variations portent surtout sur le grand repos.

La révolution cardiaque se manifeste extérieurement par les bruits du cœur et le choc du cœur.

Le premier bruit, sourd, correspond à la systole ventriculaire. Le deuxième bruit, bref et plus clair, à la fin de cette systole.

Le deuxième bruit est dû au claquement des valvules aortiques et pulmonaires, il est généralement unique, ces deux groupes de valvules fonctionnant presque simultanément; cependant, chez un certain nombre de personnes, il y a un dédoublement net de ce second bruit, et il est facile de se rendre compte des causes de ce phénomène. La pression sanguine est moindre dans l'artère pulmonaire que dans l'aorte, les valvules sigmoïdes, à la fin de la systole, au moment où le sang tend à refluer des artères dans le cœur, sont soumises à une action moindre dans l'artère pulmonaire que dans l'aorte et par suite se ferment plus lentement. En général cette différence est trop faible pour être perçue; mais, comme nous l'avons dit, sur certains individus elle est suffisante pour donner lieu au dédoublement. Remarquons d'ailleurs qu'au moment de l'inspiration le poumon se dilate, la pression de l'air est abaissée dans ce poumon et il y a un appel de sang dans ses vaisseaux, ce qui produit encore un abaissement de pression dans l'artère pulmonaire. Pour cette raison le dédoublement du second bruit est plus net à la fin de l'inspiration, surtout quand on fait une inspiration forcée. Dans certains cas pathologiques il peut arriver que la pression devienne plus grande dans l'artère pulmonaire que dans l'aorte, c'est ce qui a lieu dans le rétrécissement mitral où, par suite de la résistance que le sang rencontre au passage de l'orifice auriculo-ventriculaire gauche, il y a augmentation de pression dans les veines et l'artère pulmonaire, et diminution dans l'aorte. Il y a alors encore dédoublement du second bruit, mais les valvules pulmonaires claquent avant les valvules aortiques.

Le premier bruit est complexe, c'est un bruit musculaire accompagné de celui que produit la fermeture des valvules auriculo-ventriculaires et dû aussi, en partie, à des mouvements de liquide.

Le choc du cœur se produit dans le cinquième espace intercostal gauche, rarement dans le quatrième. Il concorde avec la systole ventriculaire, et est dû aux changements de forme et de position du cœur. Ces changements occasionnent une variation de la pression du cœur contre la paroi thoracique qui se traduit au dehors. Nous reviendrons plus en détail sur ce choc du cœur, un peu plus loin.

Étude de la pression dans le cœur.

Pendant toute la durée d'une révolution cardiaque, il y a dans les diverses cavités du cœur des variations de pression correspondant aux différentes phases. L'étude de ces variations de pression

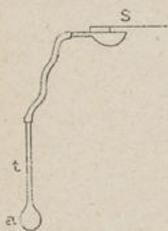


Fig. 136.

est des plus importantes, car ce sont elles qui règlent la circulation du sang dans les vaisseaux. Chauveau et Marey les premiers les ont étudiées méthodiquement chez le cheval. Pour cela ils se servaient de sondes cardiaques. Une sonde cardiaque simple se compose essentiellement d'un tube métallique *t*, portant à une de ses extrémités une ampoule élastique *a*. L'autre extrémité est reliée au moyen d'un tube en caoutchouc à un tambour de Marey;

tout l'appareil est plein d'air. On peut introduire la sonde dans le ventricule gauche en passant par la carotide. Dès lors, l'ampoule *a* sera soumise à toutes les variations de pression qui se produiront dans le ventricule, et les variations de volume de cette ampoule pourront être enregistrées au moyen du style *s* appuyé contre un cylindre tournant.

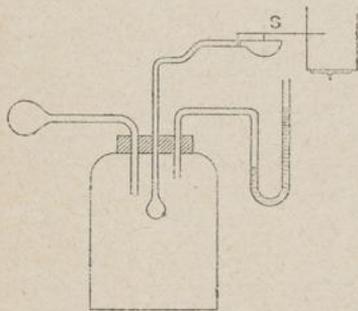


Fig. 137.

bouché par un bouchon à trois trous; l'un donne passage à la sonde, le second à un manomètre, le troisième à un appareil de compression, une seringue ou une poire. On établit alors successivement dans le flacon des pressions de 1, 2, 3, ... cm. de mercure, on enregistre les déviations correspondantes du style, et on a ainsi une échelle permettant d'étudier toutes les courbes de pression obtenues au moyen de la sonde que l'on vient de graduer.

Il est impossible de pénétrer d'une façon analogue dans l'oreillette gauche, il faudrait en effet y arriver par les veines pulmonaires.

Pour le cœur droit Chauveau et Marey ont fait des sondes doubles (fig. 138). Deux tubes concentriques sont en communication l'un avec l'ampoule supérieure, l'autre avec l'ampoule inférieure. On pénètre par la veine jugulaire, on arrive dans l'oreillette droite et de là on passe dans le ventricule par l'orifice auriculo-ventriculaire. La distance des deux ampoules est réglée de telle sorte que la première étant dans le ventricule la seconde reste dans l'oreillette. La suite des opérations se fait comme pour une sonde simple.

Si l'on désire avoir la pression dans l'aorte au-dessus des valvules sigmoïdes, on peut, au moyen de la sonde simple, l'obtenir en retirant cette sonde d'une certaine quantité, de façon à passer au-dessus des valvules.

Un autre procédé consiste à introduire dans la cavité à explorer une extrémité d'un tube ouvert aux deux bouts, l'autre extrémité est reliée à un manomètre enregistreur auquel la pression se transmet. Dans ces conditions tout l'espace compris entre le manomètre et la cavité à explorer doit être rempli de liquide, la présence de l'air soumis à des variations de pression donnerait lieu à des oscillations qui fausseraient les indications de l'appareil. L'emploi du manomètre à mercure n'est pas à recommander pour ce genre de recherches; par suite de l'inertie énorme de ce liquide, les indications de cet instrument sont considérablement altérées aussitôt qu'il est en régime variable. Aussi a-t-on imaginé de nombreux dispositifs pour le remplacer.

En réalité on ne met pas la cavité où l'on veut étudier la pression en communication directe avec un tambour de Marey, car cette pression étant généralement trop forte la membrane du tambour serait rompue. On évite cet accident au moyen du sphygmoscope

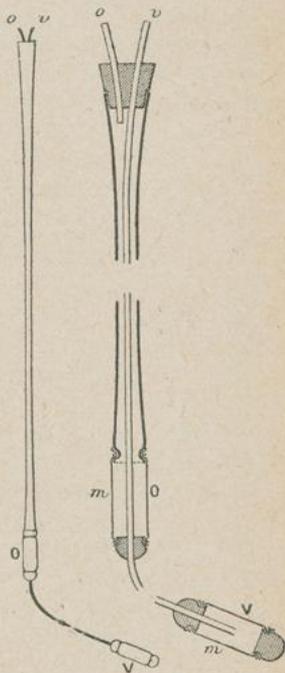


Fig. 138.

de Chauveau. Cet instrument donne de très bons résultats, il a l'avantage d'être facile à construire, malheureusement il faut le graduer très fréquemment, sinon après chaque expérience. Il se compose essentiellement d'un doigt de gant en caoutchouc (fig. 139) dont on coiffe un bouchon perforé muni d'un tube en verre comme l'indique la figure. C'est par ce tube en verre que l'on reliera l'appareil soigneusement rempli de liquide à la sonde manométrique. Lors des variations de pression le doigt de gant subira des changements de volume; pour les enregistrer on enfonce le bouchon coiffé de son doigt de gant dans un tube en

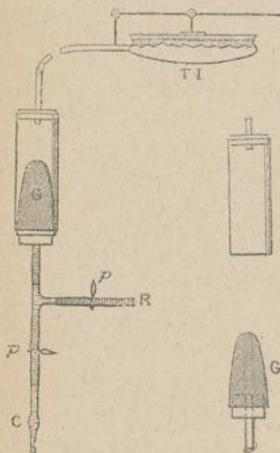


Fig. 139.

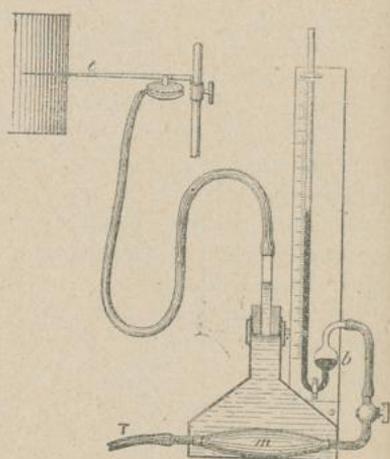


Fig. 140.

verre dont l'autre extrémité est munie d'un bouchon à travers lequel passe un petit tube de verre, relié par un tube de caoutchouc à un tambour de Marey. Il est aisé de se rendre compte, d'après la figure, de la façon dont l'instrument fonctionne. Il suffit de graduer l'appareil comme on l'a fait pour les sondes de Chauveau et Marey.

Marey a construit un appareil basé sur l'emploi des capsules du baromètre anéroïde. Le sang communique avec l'intérieur de cette capsule (fig. 140) placée dans un flacon clos, contenant du liquide jusqu'à une certaine hauteur. L'air qui se trouve au-dessus de ce liquide est en communication avec un tambour de Marey enregistreur. L'appareil est en outre muni d'un manomètre à mercure que l'on peut isoler et qui permet un étalonnage facile. Pour cela

on met le tube T en communication avec un réservoir où l'on fera varier la pression, une simple seringue suffira. On ouvrira le robinet d'accès du manomètre et on lira les pressions correspondant aux diverses excursions du style enregistreur. Quand on veut prendre un tracé, on ferme le robinet pour éviter que les oscillations de la colonne de mercure n'agissent sur la capsule manométrique.

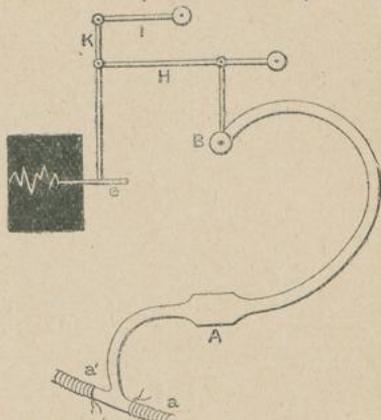


Fig. 141.

Fick a employé deux dispositifs différents. L'un (fig. 141) est en somme un tube de manomètre Bourdon, à l'intérieur duquel on fait arriver le liquide dont on veut étudier la pression, et dont les mouvements amplifiés s'inscrivent par un système de levier indiqué sur la figure. Pour l'autre, le liquide arrive dans une très petite cavité *b* (fig. 142) et refoule plus ou moins une membrane en caoutchouc *c* portant

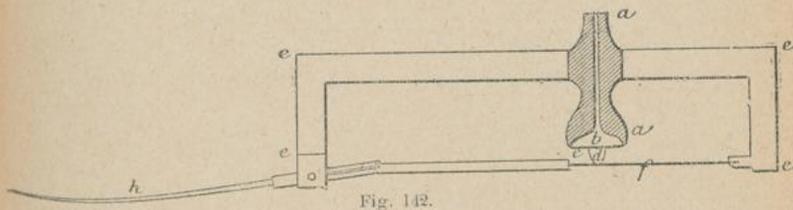


Fig. 142.

un bouton d'ivoire *d*. Ce bouton bute contre un ressort *f* dont les flexions sont enregistrées par le levier *h*.

De nombreux appareils ont encore été imaginés par divers auteurs, ce sont des modifications de ceux qui viennent d'être décrits.

Voyons maintenant quels sont les résultats obtenus.

La figure 143 est une représentation schématique des variations de pression dans les cavités du cœur, toutefois la pression dans les oreillettes a été exagérée afin de rendre le tracé plus net. On

a indiqué aussi les moments des mouvements valvulaires et les bruits du cœur. On voit que, les ventricules se contractent simultanément, et qu'entre leur systole et celle des oreillettes il y a un certain intervalle. Cet intervalle est très variable, il a même échappé à certain auteurs, mais M. Chauveau en a établi l'existence. La systole auriculaire est suivie à un certain intervalle d'une aspiration qui serait principalement due à un abaissement du plancher des oreillettes. De même la systole des ventricules est accompagnée d'une chute analogue de la pression. On voit

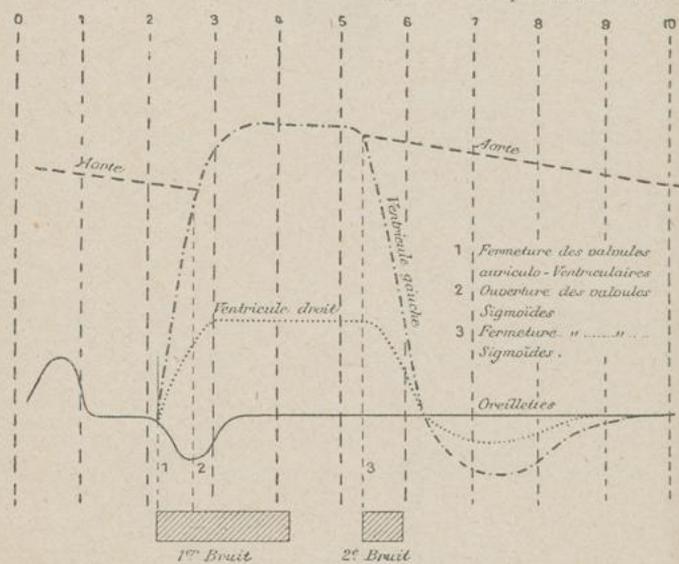


Fig. 143.

que le maximum de pression dans le ventricule gauche est bien supérieur à celui du ventricule droit. La pression dans l'aorte ne tombe jamais très bas; au moment où la tension s'étant élevée dans le ventricule gauche les valvules sigmoïdes s'ouvrent, il y a une lancée de sang qui fait croître la pression dans l'aorte et les grands vaisseaux voisins. L'ensemble élastique de ces vaisseaux joue le même rôle que le ballon placé sur les tubes des pulvérisateurs; ils se dilatent, et après la clôture des valvules sigmoïdes, la pression ne baisse que lentement jusqu'à une contraction nouvelle.

Voici, non pas les chiffres absolus des pressions que l'on observe,

mais des valeurs approximatives et relatives. Chauveau et Marey ont trouvé chez le cheval :

Oreillette droite.	2,5 mm. de mercure.	
Ventricule droit	24	—
— gauche	128	—

de Jäger chez le chien de grande taille :

Ventricule gauche	191
Aorte.	177

Goltz et Gaule chez le chien de grande taille :

Ventricule droit	53
Aorte.	130

Il est beaucoup plus facile de prendre des tracés de la pression dans les gros vaisseaux que dans le cœur ; on fait généralement l'expérience sur la carotide ou sur la fémorale. Pour cela on commence par lier le vaisseau ; puis on introduit dans le bout central une canule à trois branches *c*. Une des autres branches est munie d'un caoutchouc sur lequel on met une pince *p*. La troisième est reliée, par un caoutchouc pincé en *m*, à l'appareil enregistreur qui, dans le cas de la figure, est un manomètre à mercure (fig. 144).

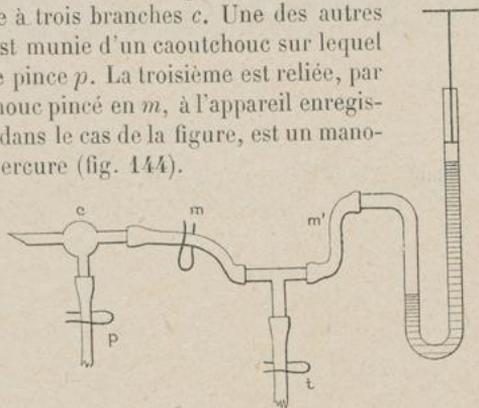


Fig. 144.

Avant de mettre la canule sur la carotide, on a rempli tous les tubes en caoutchouc et la canule d'une solution concentrée de sulfate de soude pour retarder les coagulations. Une fois la canule *c* placée, on introduit en *t* la pointe d'une seringue chargée de la même solution, et l'on pousse sur le piston jusqu'à ce que le manomètre indique approximativement la pression supposée du sang, on ferme la pince *t* et on ouvre *m*. Aussitôt on voit le mercure osciller, et si la branche libre est munie d'un flotteur, on peut enregistrer

sur un cylindre tournant toutes les variations de pression (fig. 145). S'il se fait une coagulation de sang, on porte la pince *m* en *m'*, on serre provisoirement l'artère avec les doigts, et ouvrant *p* et *t* on fait une chasse de sulfate de soude par *t*; elle sort par *p* entraînant

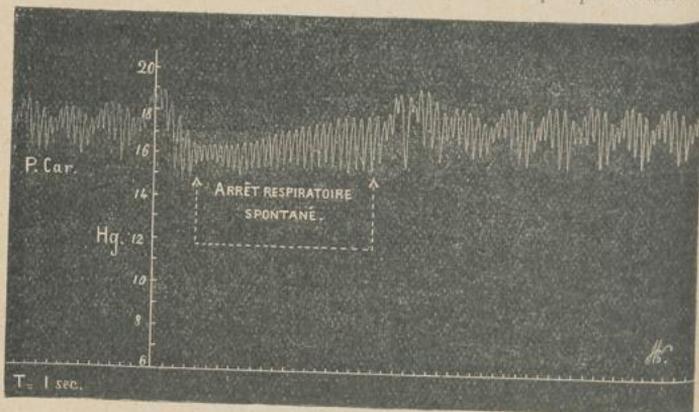


Fig. 145.

les caillots. Puis on ferme de nouveau *p* et *t*, et on ouvre *m'*.

Souvent on arrive par un semblable lavage à se débarrasser complètement des caillots et à pouvoir continuer le tracé.

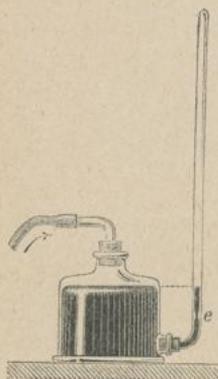


Fig. 146.

Dans cette expérience l'inertie du mercure a moins d'influence que dans les recherches sur le cœur, parce que les variations de pression et par suite les oscillations sont beaucoup plus limitées.

L'appareil indicateur varie du reste, quoique le dispositif indiqué ci-dessus, dû à Ludwig, soit le plus courant. Hales, qui fit les premières recherches de ce genre, mettait simplement l'artère en communication avec un tube vertical dans lequel le sang montait, il en résultait une véritable hémorragie. C'est Poiseuille qui lui substitua le manomètre à mercure, et Ludwig qui le rendit

enregistreur. On peut aussi se servir d'un manomètre élastique. Dans le cas où l'on se contente d'étudier la pression moyenne,

on fait usage du manomètre de Marey, dans le tube duquel il y a un étranglement *e* créant au passage du sang une résistance telle qu'il en résulte un amortissement des oscillations. Il s'établit alors un niveau moyen (fig. 146).

Il serait très important, tant au point de vue de la physiologie

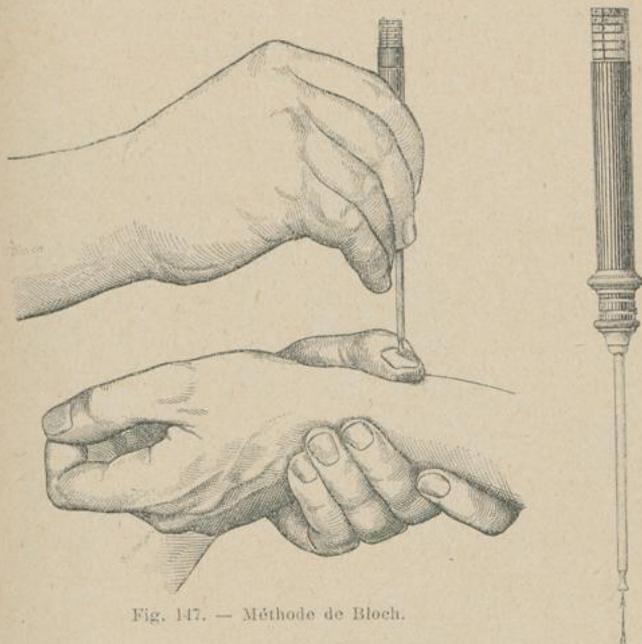


Fig. 147. — Méthode de Bloch.

que de la pathologie, de pouvoir déterminer la pression sanguine chez l'homme, sans, bien entendu, produire aucune lésion. L'idéal serait de déterminer toutes les variations de la pression sanguine dans une artère, comme on le fait sur les animaux dans le laboratoire, mais cela paraît impossible. Jusqu'à présent les appareils imaginés n'ont pour but que de mesurer soit la pression maxima seule, soit les limites entre lesquelles oscille la pression.

Méthode de Bloch. — Bloch a proposé un procédé fort simple pour évaluer approximativement la pression maxima dans la radiale. Il consiste à saisir le poignet du sujet, les quatre doigts en dessous et le pouce en dessus appliqué sur la radiale, à l'endroit où l'on tâte le pouls. A l'aide d'une tige agissant sur un ressort à

boudin renfermée dans un étui, on exerce une pression sur l'ongle du pouce jusqu'à ce que l'ondée sanguine cesse de passer (fig. 147). A ce moment on lit sur une graduation la grandeur de la compression exercée.

Remarquons que le pouce ne doit par lui-même ni aider ni entraver la compression, il doit rester absolument libre ; il y a là une première petite difficulté, mais à laquelle on peut s'habituer.

Une autre cause d'erreur résulte de l'appréciation du moment où l'ondée sanguine cesse de passer sous la pulpe du pouce, mais

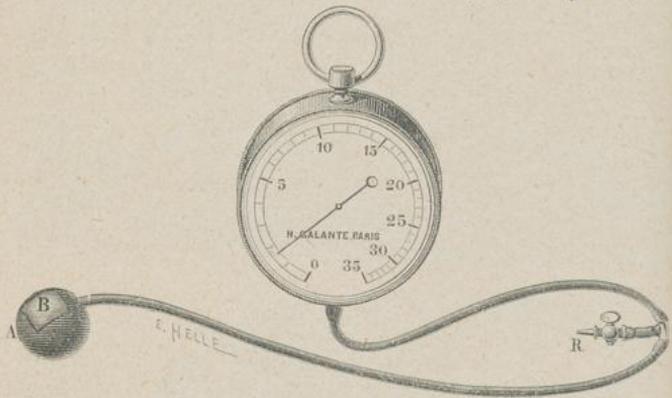


Fig. 148.

vient seulement battre contre elle. Enfin il est évident que pour une même force totale lue sur la graduation, la compression de l'artère est différente suivant que le pouce de l'opérateur est en contact avec le poignet du sujet par une surface plus ou moins considérable. Je n'insiste pas sur d'autres causes d'erreur.

Il ne faut pas demander à cet instrument plus que l'indication approximative, entre les mains d'un même opérateur, d'une pression anormalement haute ou basse. Dans ces conditions, comme il est très portatif, il peut rendre service.

Méthode de Basch-Potain. — Ce procédé a été imaginé par von Basch et perfectionné par Potain. On comprime la radiale au moyen d'une petite pelote en caoutchouc remplie d'air et reliée à un manomètre métallique (fig. 148). En tâtant l'artère en aval du point comprimé on vérifie que le pouls cesse de battre ; à ce moment on lit la pression du manomètre que l'on considère

comme
extérieu
évident
qui lui
une co
Ce rais
interpo
Evid

l'artère
résulte
cliniqu
Mais t
résulta
On
que l'
manon
l'opér
la mai
temps

comme représentant la pression artérielle. Tant que la pression extérieure à l'artère est inférieure à celle du sang, il est en effet évident que celui-ci peut s'écouler; il peut forcer le passage, ce qui lui devient impossible au moment où le vaisseau s'oblitére par une compression extérieure supérieure à la pression intérieure. Ce raisonnement suppose qu'il n'y ait aucune résistance passive interposée entre le sang et l'air contenu dans la pelote.

Evidemment cela n'est pas rigoureusement exact; la paroi de



Fig. 149. — Méthode de Basch-Potain.

l'artère, les tissus, la peau s'opposent à la compression et il en résulte une légère erreur par excès. Il ne semble pas toutefois que cliniquement les écarts dus à cette cause aient grande importance. Mais une application vicieuse de la méthode peut conduire à des résultats fautifs. Voici comment on doit opérer :

On commence par gonfler légèrement la pelote par le robinet R, que l'on ferme ensuite. Potain parlait ainsi de la division 5 du manomètre. Puis, la main du sujet étant dans la demi-pronation, l'opérateur la saisit avec la main homonyme (droite pour explorer la main droite), et, tâte le pouls avec l'index (fig. 149). En même temps, pour éviter les erreurs dues à la récurrence du pouls, il

écrase la radiale, en premier lieu avec le médius placé un peu au-dessous de l'index, en second lieu avec l'annulaire comprimant dans la tabatière anatomique. Le pouce sert à maintenir le poignet. Avec l'index de l'autre main on serre la pelote sur l'artère, le secteur B en caoutchouc mince se trouvant sur cette artère, au-dessus du point où l'on tâte le pouls, et on cherche la position permettant d'intercepter le pouls avec la pression minima. On peut en effet, par une position vicieuse de la pelote, comprimer sur un tendon, ce qui donnerait une pression trop haute.

Il est nécessaire que le sujet abandonne complètement sa main, sans raidir en quoi que ce soit son poignet; le mieux est de l'appuyer sur le genou de l'opérateur, dont le pied sera sur un tabouret, un barreau de chaise ou une tringle du lit, de façon à maintenir le poignet à la hauteur du cœur du sujet.

Les résultats obtenus par cette méthode, à la suite de nombreuses mesures faites par Potain, ont été publiés après sa mort par son élève P. Teissier. Il y a intérêt à rappeler ici tout au moins les moyennes des pressions trouvées aux divers âges chez le sujet normal :

6 ans à 10 ans.	9	centimètres.
10 — à 15 —	13,5	—
15 — à 20 —	15	—
20 — à 25 —	17	—
25 — à 30 —	18	—
30 — à 40 —	19	—
40 — à 50 —	20	—
50 — à 60 —	21	—
60 — à 80 —	22	—

L'appareil de Potain a l'avantage de pouvoir s'appliquer à la mesure de la tension de toute artère dans laquelle on peut sentir le pouls et que l'on peut comprimer à travers la peau sur un plan résistant, de façon à y interrompre la circulation.

En général, on opère sur la radiale avec les précautions indiquées plus haut; la temporale ou la pédieuse se prêtent également à cette mesure.

Mais à côté de ces avantages, il a des inconvénients sérieux. L'emploi du sphygmomanomètre de Potain exige une assez grande habitude. Le fait d'effacer plus ou moins complètement les récurrences, de bien trouver la meilleure place pour la pelote, de percevoir délicatement le pouls avec l'index de la même main qui

supprime la récurrence, sont des facteurs pouvant influer sur le résultat et conduire à des écarts variables suivant les opérateurs. On a donc cherché des procédés moins sujets aux erreurs individuelles.

Méthode de Riva Rocci. — De nombreux appareils sont basés sur le principe de Riva Rocci. La mesure de la pression se fait

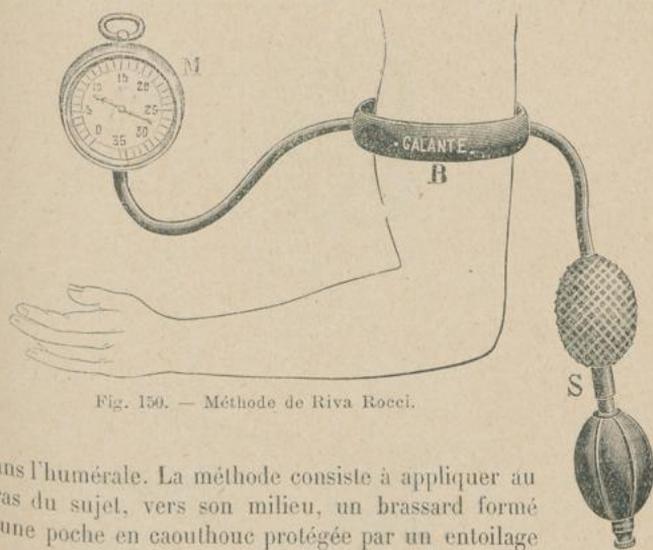


Fig. 150. — Méthode de Riva Rocci.

dans l'humérale. La méthode consiste à appliquer au bras du sujet, vers son milieu, un brassard formé d'une poche en caoutchouc protégée par un entoilage et serrée sur le bras par un arrêt variable suivant les modèles. Cette poche est reliée à un compresseur d'air et à un manomètre. On cherche quelle est la pression d'air nécessaire pour que l'humérale cesse d'être perméable au sang ou, plus exactement, pour que le pouls cesse d'être perceptible à la radiale. En somme, la pelote de Basch-Potain comprimant la radiale a été remplacée par un brassard circulaire agissant sur tous les tissus du bras et comprimant par leur intermédiaire l'humérale.

Dans l'appareil initial de Riva Rocci, le brassard était formé par une poche en caoutchouc de 4-5 cm. de largeur recouverte d'une garniture en soie, et assez longue pour faire au moins une fois le tour du bras sur lequel on l'enroulait en l'arrêtant par une sorte de pince à cravate. L'intérieur du brassard communiquait par un tube en caoutchouc avec un manomètre à mercure et un insufflateur de Richardson. On vérifiait que l'artère était ou non

perméable en tâtant le pouls du sujet et on lisait la pression correspondant au moment limite où le pouls cessait d'être perceptible.

De cette méthode dérivent divers appareils par une modification, soit du brassard, soit du manomètre, soit du mode de compression de l'air ou du procédé employé pour apprécier la perméabilité de l'humérale.

Actuellement, le modèle le plus parfait est le sphygmo-signal de

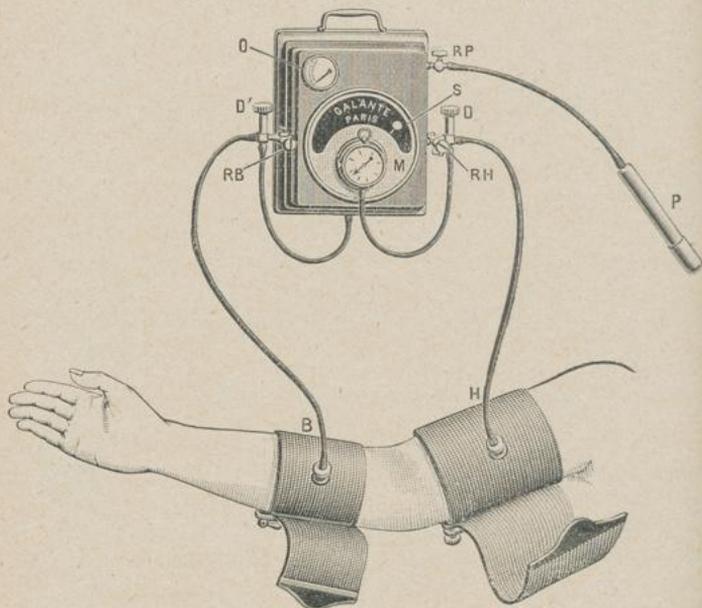


Fig 151. — Méthode de Vaquez.

Vaquez. Il se compose essentiellement d'un réservoir où l'on fait une provision d'air comprimé à l'aide d'une pompe de bicyclette. Le brassard compresseur de l'humérale, sur lequel je reviendrai plus loin, est relié à ce réservoir et à un manomètre métallique sur lequel on lira la pression exercée dans le brassard.

Pour reconnaître si le sang continue ou non à passer, au lieu de tâter le pouls, on fixe sur l'avant-bras, un peu au-dessous du pli du coude, un deuxième brassard relié également au réservoir d'air comprimé et à un signal de construction spéciale.

Quand, ouvrant le robinet RB, on fait monter peu à peu la

pression dans le brassard explorateur, on voit l'aiguille du signal dévier du zéro, et pour une certaine position, variable suivant le sujet, se mettre à battre périodiquement, synchroniquement au pouls. Ce résultat obtenu, on fait passer de l'air dans le brassard compresseur et on lit le manomètre au moment où l'aiguille du signal cesse de battre. On admet que l'on obtient ainsi la pression sanguine maxima. Cela équivaut à dire que la pression de l'air du brassard

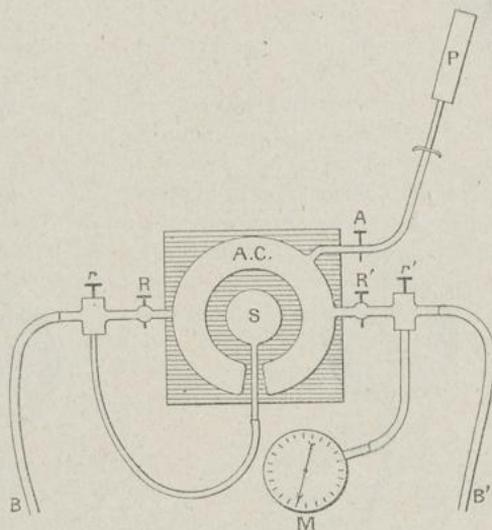


Fig. 152. — Schéma des connexions du signal de Vaquez.

A.C., réservoir à air comprimé; P, pompe; S, signal; M, manomètre; B, brassard explorateur; B', brassard compresseur; R, robinet pour donner admission de l'air comprimé au brassard explorateur et au signal; r, robinet de fuite pour dégonfler plus ou moins le brassard explorateur et le signal dans le cas où l'on aurait laissé monter la pression trop haut; R', r', robinets jouant le même rôle pour le brassard compresseur et le manomètre.

compresseur a précisément suffi à vaincre la pression sanguine.

En réalité cela n'est pas exact; Pachon a montré que lorsque l'aiguille du signal de Vaquez cesse de battre, cela ne tient pas à ce que le courant sanguin est arrêté, mais à ce qu'il est *régularisé*, la poche de caoutchouc du brassard compresseur fonctionnant alors comme le ballon de l'appareil de Richardson. L'arrêt des battements ne correspond donc pas au moment où la pression de l'air du brassard est égale à la pression maxima du sang dans les artères.

Méthode de Gærtner. — Dans cette méthode on fait usage d'un anneau métallique, muni à son intérieur d'une poche de caoutchouc (fig. 153). On passe cet anneau à l'un des doigts au niveau de la deuxième phalange, puis on chasse le sang de l'extrémité du doigt à l'aide d'un lien de caoutchouc AB que l'on enroule sur lui en partant de l'extrémité distale (fig. 154). Cela fait, on comprime de l'air dans l'anneau par le tube T et on enlève le lien (fig. 155). Le sang ne peut revenir à l'extrémité du doigt, qui paraît blanc cireux. On décomprime peu à peu et on note l'instant où l'ongle redevient rouge; à ce moment on lit la pression sur le manomètre.



Fig. 153.

L'application de cette méthode est très simple, le moment du

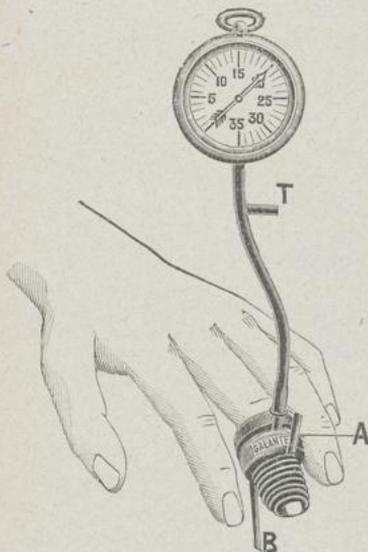


Fig. 154. — Méthode de Gærtner.

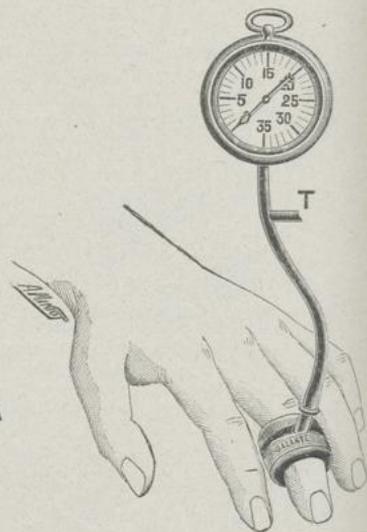


Fig. 155.

retour du sang est très précis, et cependant elle doit être considérée comme très infidèle. Fût-elle bonne en principe, il est évident que ses résultats ne peuvent être comparés à ceux du signal de Vaquez, par exemple. Dans l'un des cas, on mesure la pression de l'humé-

rale : dans l'autre, celle des petites artères de l'extrémité des doigts où, comme on sait, elle doit être plus faible.

Mais, en outre, il y a un fait grave, en dehors de toute discussion de principe : on ne trouve pas la même pression aux divers doigts.

Voici un résultat de mesure :

Index.	13
Médius	15,5
Annulaire.	18
Auriculaire	13

Ce ne sont pas là des écarts négligeables, et aucune raison valable ne permet d'adopter un de ces chiffres de préférence aux autres. Il y a pis. En plaçant l'anneau à la première phalange, on trouve généralement une pression plus basse que celle obtenue à la deuxième phalange, et c'est le contraire qui devait avoir lieu. Cela ne tient pas uniquement à des questions de variation de calibre du doigt par rapport à l'anneau ; car on n'observe aucun écart régulier à cet égard. Il y a donc lieu de se méfier de la méthode de Gærtner.

Méthode de Marey. — Les méthodes précédentes ont pour but de déterminer la pression maxima qui accompagne chaque systole cardiaque, ou pression systolique.

D'autres appareils, basés sur un principe dû à Marey, permettent de mesurer la pression minima ou diastolique.

Marey a fait remarquer que si l'on exerce sur une artère une pression extérieure légèrement supérieure à la pression minima intérieure, l'artère s'aplatit complètement au moment du minimum intérieur, tandis qu'elle se gonfle pendant l'onde systolique. C'est dans ces conditions que le volume extérieur de l'artère subit les plus grandes variations. Pour une pression extérieure moindre, l'artère ne s'aplatit pas pendant la diastole, pour une pression plus grande elle ne se dilate pas aussi bien.

Hill et Barnard ont appliqué ce principe à la mesure de la pression diastolique ; pour cela ils placent sur le bras un brassard B relié à un manomètre M et à une pompe de compression P (fig. 156). En comprimant de l'air dans le brassard, on voit à un moment donné l'aiguille du manomètre se mettre à battre, ces



battements vont pendant quelque temps en augmentant d'amplitude avec la pression, puis ils diminuent. On lit la pression correspondant au maximum d'amplitude et on considère qu'elle correspond à la pression diastolique.

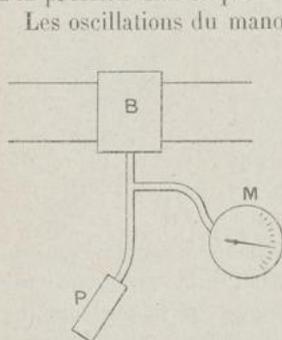


Fig. 156.

Les oscillations du manomètre métallique sont en général assez faibles et leurs variations d'amplitude difficiles à apprécier. Pachon a fait remarquer en outre qu'il y a dans l'appareil de Hill et Barnard une cause d'erreur provenant de ce que la sensibilité du manomètre va en diminuant à mesure que la pression interne augmente, ce qui fausse les indications. Pour éviter cette cause d'erreur Pachon place l'indicateur d'oscillation à l'intérieur d'un réservoir contenant de l'air à la même pression que l'indicateur (fig. 157). Dans ce cas, la membrane élastique de cet indicateur subit sur ses deux faces la même pression et n'est pas tendue; mais, naturellement, les pulsa-

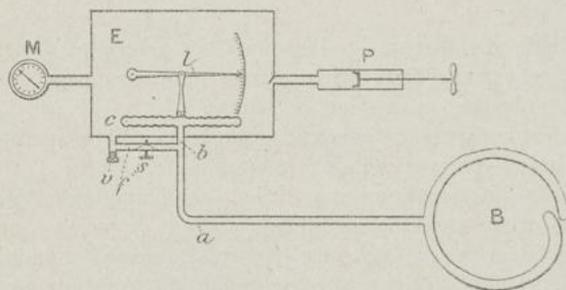


Fig. 157.

tions venant du brassard ne la font pas osciller. Quand on veut voir quelle est la valeur des pulsations, on écrase en *s* un tube de caoutchouc qui isole le brassard et l'intérieur de l'indicateur de la chambre à air comprimé où se trouve ce dernier, aussitôt on le voit battre. Le manomètre *M* donne la pression de l'air. Pour faire une détermination, on exerce, à l'aide de la pompe *P*, une pression manifestement supérieure à celle du sang, puis on descend peu à

peu en manœuvrant la valve de fuite V, et, de temps en temps, en écrasant en s on cherche où en sont les pulsations. La plus petite pression qui éteint complètement les oscillations correspond à la pression systolique; la pression qui donne les oscillations maxima correspond à la pression diastolique.

La figure 157 est un schéma du dispositif, la figure 158 repré-

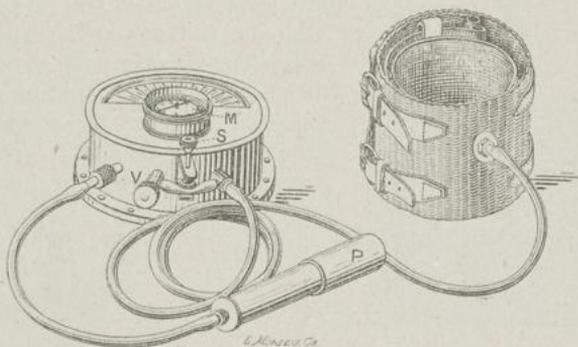


Fig. 158.

sente une vue de l'appareil auquel Pachon a donné le nom d'*oscillomètre sphygmométrique*.

Vitesse du sang.

L'étude de la vitesse de propagation du sang est un problème extrêmement difficile; il est aussi très important, car la nutrition des organes est directement liée à la quantité de sang qui les irrigue.

Pour faire une mesure de vitesse du sang, il faut absolument interrompre le vaisseau en un point de son parcours et y intercaler l'appareil de mesure. Il est impossible de ne pas introduire par cette opération une première cause d'erreur très importante. De plus, les appareils eux-mêmes sont d'un maniement très délicat. On peut les diviser en deux catégories, ceux où l'on mesure la quantité de sang débitée dans un laps de temps déterminé, et qui ne donnent par suite qu'une vitesse moyenne, et ceux qui en indiquent la valeur à chaque instant et permettent d'en suivre toutes les variations.

Dans la première catégorie nous pouvons placer le plus ancien en date de ces instruments, l'hémodynamomètre de Volkmann et la Stromuhr de Ludwig qui en est un perfectionnement (fig. 159 et 160).

L'hémodynamomètre de Volkmann se compose d'un tube en U renversé mastiqué dans un ajutage dont le détail se fait voir en C et B. On remplit le tube en U d'eau salée, en mettant les robinets dans la position C on intercale la garniture métallique sur le trajet du vaisseau sur lequel on expérimente. Le sang entrera par exemple par *a* et sortira par *d*.

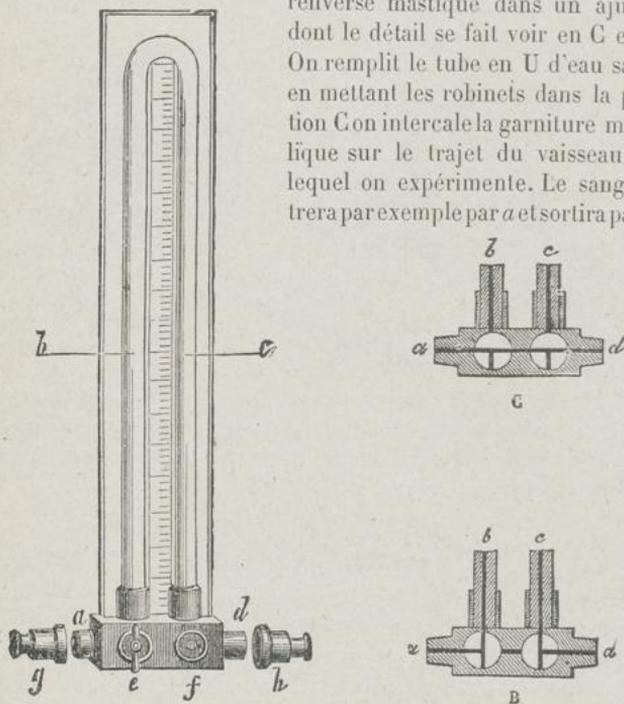


Fig. 159.

Brusquement on met les robinets dans la position B, le sang est obligé de parcourir le tube en U, et avec une montre à seconde on compte combien il lui faut de temps pour chasser l'eau salée devant lui.

La Stromuhr de Ludwig (fig. 160) se compose de deux ampoules communiquant entre elles par la partie supérieure, et terminées inférieurement par des tubes sur lesquels on lie les bouts sectionnés du vaisseau.

On commence par remplir une des ampoules d'huile, l'autre de

sérum et on les intercale sur le vaisseau, l'huile étant du côté central. Au moment où le courant s'établit, le sérum est chassé dans la circulation, l'huile prend sa place, étant elle-même remplacée par du sang. Si l'on a compté combien il faut pour cela de secondes, si en plus on connaît le volume des ampoules, on en déduit le débit du vaisseau. On peut, au moment où toute l'huile a passé de H en S,

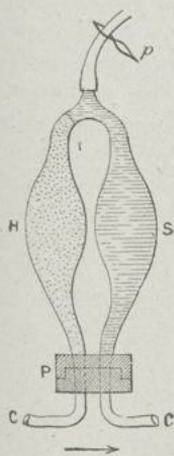


Fig. 160.

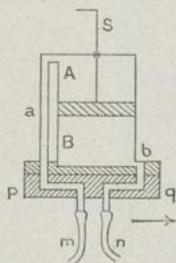


Fig. 161.

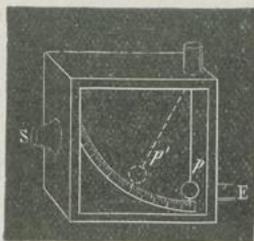


Fig. 162.

faire tourner les deux récipients et les substituer l'un à l'autre, et répéter cette même opération un grand nombre de fois. Cela permet d'étudier le débit pendant un temps assez prolongé.

Dans ces derniers temps Hurthle a modifié la Stromuhr d'une façon très ingénieuse pour en faire un appareil enregistreur. Les deux ampoules sont remplacées par deux vides laissés de part et d'autre d'un piston dans un petit corps de pompe (fig. 161). Les tubes d'amenée *a* et *b* débouchent vis-à-vis de deux conduits creusés dans un plateau *PQ* pouvant tourner autour de son axe. Ces deux conduits aboutissent au moyen de tubes en caoutchouc souples aux canules *m* et *n* destinées à être placées dans le bout central et périphérique de l'artère. Dans le cas de la figure, le sang arrivera par *m*, le piston descendra. Au moment où il sera arrivé au bout de sa course on fera rapidement tourner le plateau

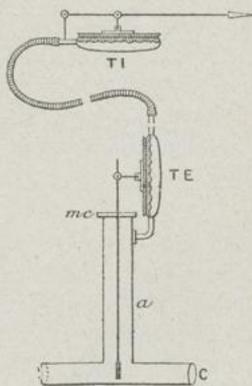


Fig. 163.

PQ de 180° de façon à intervertir les communications, le piston sera chassé de bas en haut, puis on fera une rotation de sens inverse et ainsi de suite. Le piston se déplace évidemment de quantités proportionnelles au débit dont on pourra donc enregistrer la valeur et les variations au moyen du style S appuyé contre un cylindre tournant.

Dans l'hémotachomètre de Vierordt, le sang traverse une petite

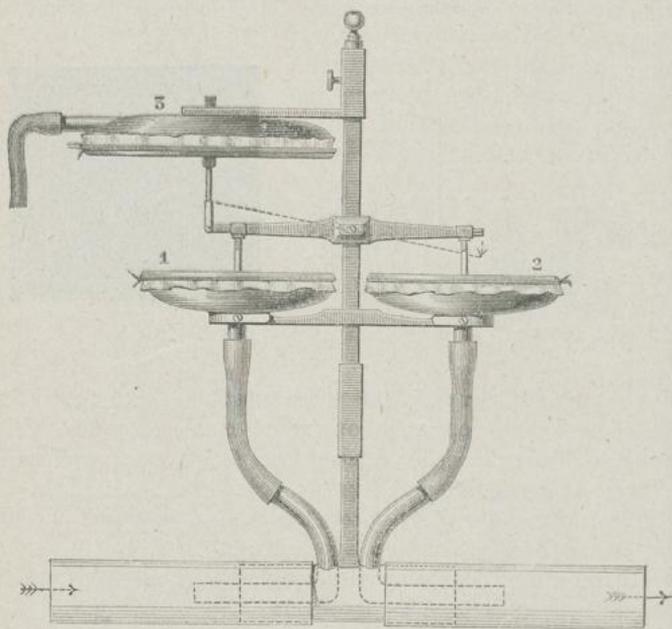


Fig. 164.

boîte, entrant par E (fig. 162) et sortant par S; il heurte au passage un petit pendule p dont la déviation croît avec la vitesse du courant. Cette déviation se lit sur un arc gradué. Ce procédé est très imparfait, quand cela ne serait que par suite des remous qui se forment dans la boîte et dont il est impossible de tenir compte. M. Chauveau lui a fait subir une série de transformations, elles l'ont conduit à son hémodynamomètre qui, rendu enregistreur, est devenu l'hémodynamographe (fig. 163). Le tube CC est intercalé sur le trajet de l'artère à étudier. Dans son passage le sang frappe

contre une petite palette traversant une membrane en caoutchouc *mc* et agissant sur un tambour de Marey explorateur TE. Le tambour récepteur TI enregistrera la courbe des vitesses sur un cylindre tournant.

Un autre appareil enregistreur de la vitesse a été imaginé par Marey, il est basé sur ce que l'on nomme les tubes de Pitot, et représenté sur la figure 164.

Le sang traverse un tube dans le sens des flèches; dans l'axe de ce tube sont placés deux tubes plus petits, ouverts celui de gauche contre le courant, celui de droite en sens inverse. Le sang tend à exercer une compression dans le petit tube de gauche, une aspiration dans celui de droite, la membrane du tambour 1 s'élève, celle du tambour 2 s'abaisse. L'ensemble de ces effets est transmis par un système de leviers à un tambour unique relié à un enregistreur comme dans l'appareil de Chauveau. Cet instrument a entre autres comme inconvénient un nettoyage difficile lorsqu'il s'y est formé des caillots.

Bien entendu, avant d'être employés, l'hémodynamographe de Chauveau et l'appareil de Marey demandent à être gradués; pour cela on les place sur un tube de caoutchouc faisant fonction d'artère, dans lequel circule de l'eau sous régime constant, on mesure le débit et on en déduit la vitesse pour les diverses indications des appareils.

Pour donner un exemple de vitesse du sang nous dirons que Chauveau a trouvé dans la carotide du cheval une vitesse moyenne de 15 cm. par seconde s'élevant, au moment de la contraction ventriculaire, à 52 cm. par seconde.

Ajoutons que le grand nombre et la variété des appareils proposés montrent combien il est difficile de trouver une solution satisfaisante pour ce genre de recherches.

Travail du cœur.

Le cœur fonctionne comme une pompe élévatrice. Considérons d'abord uniquement ce qui se passe dans l'aorte. La hauteur à laquelle le cœur élèverait le sang est égale à celle de la colonne de sang qui mesure la pression dans le ventricule; cette hauteur sera environ de 2 m. D'après ce qui a été exposé page 129, au paragraphe intitulé « travail nécessaire pour produire un écoulement déterminé », on voit qu'il suffit de connaître la quantité de sang

chassée, c'est-à-dire élevée à chaque pulsation pour pouvoir calculer le travail nécessaire à la progression du sang dans l'aorte. Ici les chiffres sont très discordants; suivant les auteurs ils varient chez l'homme de 45 g. à 188 g. par systole. On peut admettre, après critique des expériences, que selon les cas la quantité de sang varie entre 50 g. et 100 g. par systole.

Prenons le premier chiffre. Tout se passe comme si à chaque systole le ventricule gauche élevait 50 g. de sang à 2 m. de haut, ce qui correspond à un travail de $0,05 \times 2 = 0,1$ kilogrammètre. Si l'on prenait l'autre chiffre on trouverait 0,2 kilogrammètre par systole.

Le ventricule droit lance la même quantité de sang que le ventricule gauche, mais la pression est trois ou quatre fois moindre, le travail est donc aussi trois ou quatre fois moindre. Quant au travail des oreillettes, il est négligeable par rapport à celui des ventricules.

Une remarque importante s'impose. Le calcul que nous venons d'effectuer correspond à ce que l'on appelle improprement dans tous les ouvrages : « Le travail du cœur »; mais en réalité nous n'obtenons ainsi que le travail nécessaire à la mise en circulation du sang; nous ne savons pas ce que le cœur a dû dépenser pour cela. De même lorsqu'on soulève un poids à l'aide d'un moteur, on sait quel est le travail absorbé par ce soulèvement, mais on ne connaît pas la dépense du moteur. Cette question est encore trop peu étudiée pour être traitée ici.

Tracés pris sur le cœur.

On a beaucoup étudié les mouvements extérieurs du cœur, soit en l'explorant directement après l'avoir mis à nu, soit en opérant à travers la paroi thoracique.

Chez les animaux à sang froid on peut facilement isoler complètement le cœur sans qu'il cesse de battre. On peut alors enregistrer les mouvements des oreillettes ou des ventricules en appuyant sur eux de légers leviers. La figure 165 représente le double myographe de F. Franck appliqué sur un cœur de tortue et dont on inscrit ainsi les pulsations de l'oreillette et du ventricule. Un appareil analogue peut servir pour la grenouille, mais il vaut mieux sur cet animal, l'expérience étant très facile à faire, conserver le cœur en place avec sa circulation, comme le représente

la fig
dont l'
l'aide
vent e
triquer
Un



corps
due a



le cœur
Il port
les ch
branch
posé e
Le

la figure 166. On saisit alors l'organe entre deux petits cuillérons dont l'un est fixe, l'autre mobile et ramené contre le premier à l'aide d'un petit ressort ou d'un contrepoids. Ces cuillérons peuvent en même temps servir d'électrodes si l'on veut exciter électriquement le cœur.

Un bon procédé consiste aussi à enfermer le cœur séparé du

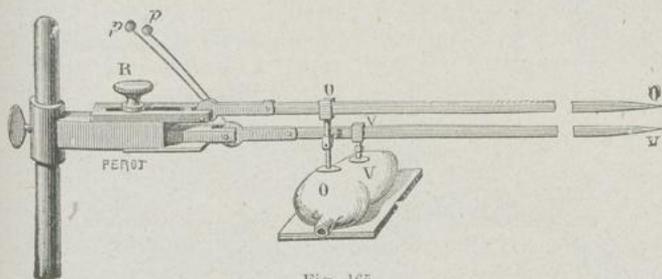


Fig. 165.

corps dans une cavité close. La première idée de ce procédé est due à Flick et Blasius; dans leur dispositif le récipient contenant

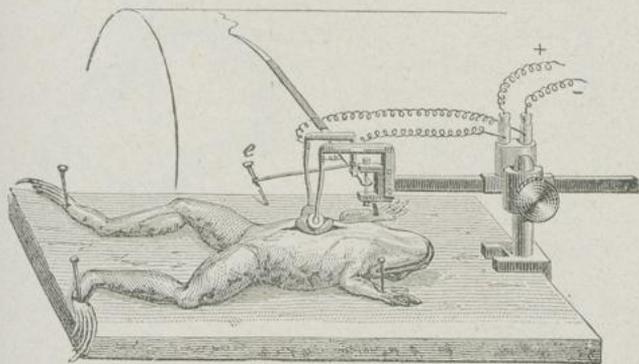


Fig. 166.

le cœur muni d'une circulation artificielle était plein de liquide. Il portait une branche latérale dans laquelle un flotteur inscrivait les changements de volume du cœur. Fr. Franck a relié cette branche latérale à un tambour de Marey, l'appareil est alors disposé comme l'indique la figure 167.

Le meilleur dispositif a été donné par M. Camus. Le cœur est

placé dans une cavité ne contenant que de l'air dont on enregistra les variations de pression. Ce cœur est relié par la veine cave et l'aorte à un récipient contenant le liquide d'alimentation ainsi que l'indique la figure 168. L'appareil ne contient que 1 ou 2 cm³ de liquide, cela suffit; c'est de l'eau salée à 7 p. 1 000 avec quelques globules de sang. Pour faire varier la température il suffit de plonger le tout dans un bain; quant à la pression on la modifie à volonté dans l'oreillette ou le ventricule en inclinant convenablement l'instrument. On peut ainsi faire d'une façon très commode des recherches sur l'action de divers poisons ou médicaments. Dans ces dernières années on a fait de nombreuses recherches

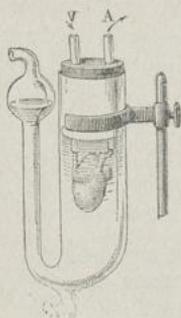


Fig. 167.

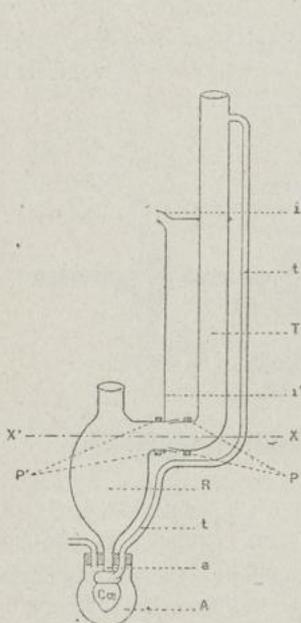


Fig. 168.

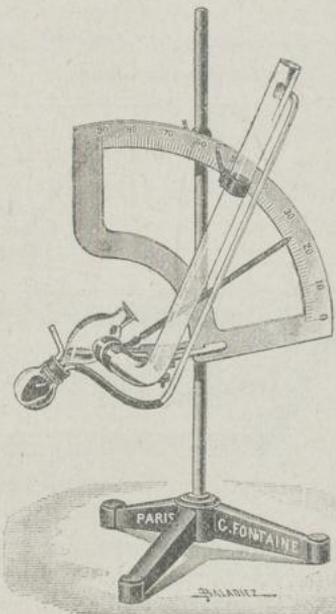


Fig. 169.

sur le cœur des mammifères isolé; cet organe peut, en effet, si on

lui fait
contin
qui a
est pl
deux c
conver
du sar
compo

accide
trées
Ch
place
appli
ou bi
tracés
Un
tracés
méth
pas s
graph
la me
suppo
comm

lui fait une bonne circulation artificielle, se séparer du corps et continuer fort longtemps à battre. On peut même ranimer un cœur qui a complètement cessé de battre avant l'extirpation. L'opération est plus délicate à exécuter que chez les animaux à sang froid, deux conditions principales doivent être réalisées, une température convenable et un apport considérable d'oxygène. Le liquide est du sang défibriné ou mieux encore un sérum artificiel dont la composition a été donnée par Locke. En outre il y a divers

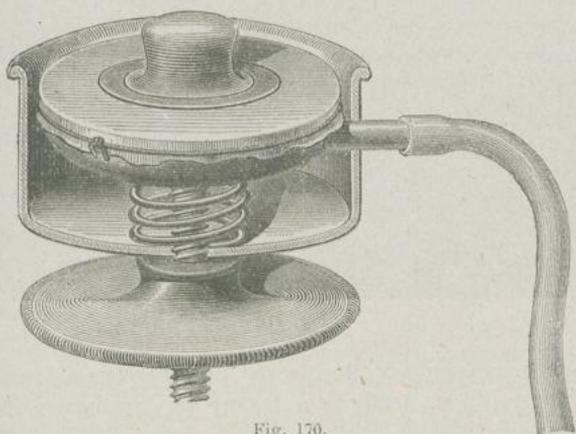


Fig. 170.

accidents dont il faut se garder : embolies par coagulation, rentrées d'air, etc.

Chez les mammifères on a le plus souvent laissé le cœur en place, en faisant la respiration artificielle et ouvrant le thorax. On applique alors sur le cœur des leviers convenablement placés, ou bien on le prend dans des pinces appropriées pour faire les tracés.

Un des problèmes les plus importants consiste à prendre des tracés à travers la paroi même du thorax, c'est en effet la seule méthode s'appliquant à l'homme et aux animaux qu'on ne veut pas sacrifier. On emploie généralement dans ce but le cardiographe de Marey, consistant essentiellement en un tambour dont la membrane porte en son milieu un bouton en ivoire ou en os, et supporté par une armature métallique ayant une forme de cloche comme l'indique la figure 170. Cette cloche est appliquée par sa

base sur la poitrine, le bouton correspondant au point où l'on veut explorer le cœur, le cinquième espace intercostal généralement.

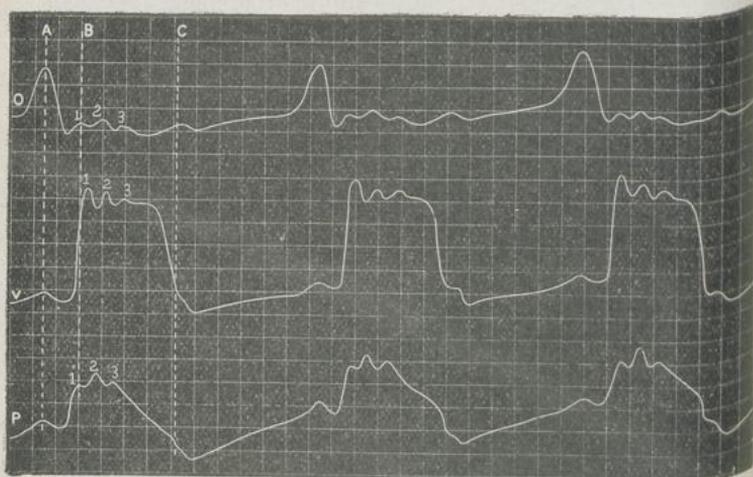


Fig. 171.

On règle la pression de ce bouton par un mouvement de vis et on relie l'appareil à un tambour récepteur qui inscrira les déplacements

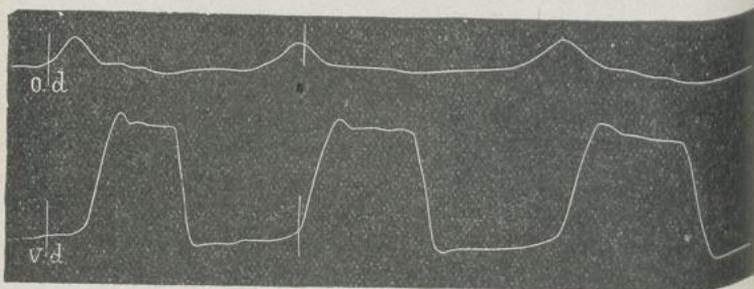


Fig. 172.

ments de son levier sur un cylindre enfumé. Des appareils analogues permettent de prendre des tracés chez les animaux. La figure 171 nous donne la concordance d'un tracé pris dans ces conditions avec le jeu des oreillettes et des ventricules. On peut reconnaître sur la courbe du choc du cœur P, d'abord la systole

auricu
ses pri
Ces

mettre
cœur
retrou
séparé
culaire
lemen

Qua
graphé
de ma
cardio
vais.

On
métho
recom
quer l'
graphi
ment
latéral
seul
donne
de la
diaque

Sphy

A c
du ven
y a u
lancée
en rés
dans t
de ce
pouls.
est an
l'on o
l'on je

auriculaire puis la systole ventriculaire avec la reproduction de ses principaux accidents.

Ces tracés cardiographiques sont difficiles à obtenir, il faut y mettre tous ses soins. Dans certains cas particuliers, lorsque le cœur était en ectopie, ce qui s'est rencontré chez l'homme et se retrouve de temps en temps chez les animaux, on a pu prendre séparément des graphiques des battements auriculaires et ventriculaires. La figure 172 en est un exemple, on retrouve alors exactement ce que l'on obtient sur un cœur à nu.

Quand on cherche à prendre un tracé avec le cardiographe de Marey appliqué sur la poitrine, on est souvent dans de mauvaises conditions; le cœur fuit devant le bouton du cardiographe, et c'est pourquoi les tracés sont en général mauvais.

On n'obtient de bons résultats qu'en se conformant à la méthode de Pachon, qui recommande de pratiquer l'exploration cardiographique systématiquement dans le décubitus latéral gauche. C'est le seul moyen qui nous donne la forme exacte de la contraction cardiaque.

Sphygmographie.

A chaque contraction du ventricule gauche il y a une onde sanguine lancée dans l'aorte, il en résulte la production, dans toutes les artères, de ce qu'on appelle le pouls. Ce phénomène est analogue à celui que

l'on observe quand on ébranle un fluide en un de ses points. Si l'on jette un caillou dans l'eau on voit une ondulation partir du

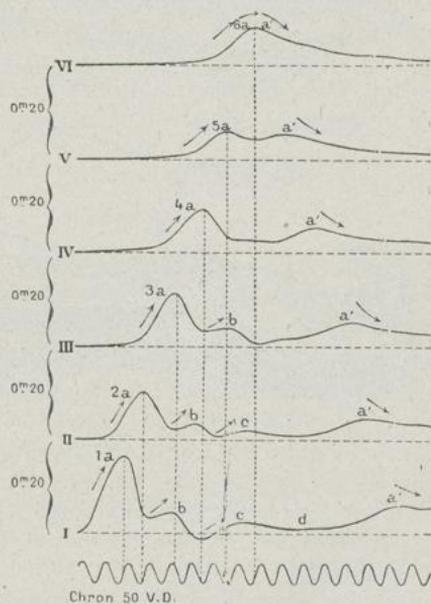


Fig. 173.

point où ce caillou est entré dans le liquide et en parcourir la surface sous forme de cercles de rayon croissant.

En plaçant une série d'appareils explorateurs sur un tube en caoutchouc plein d'eau et produisant une onde à l'une des extrémités de ce tube par une brusque introduction de liquide, Marey a mis en évidence (fig. 173) une onde analogue

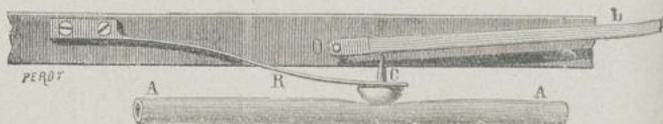


Fig. 171.

à celle que l'on voit à la surface des liquides après la chute d'une pierre en un point, se propageant dans toute la longueur du tube.

Dans le cas de la pulsation cardiaque le même phénomène se produit, une onde partant du cœur parcourt toutes les artères. Le phénomène que l'on perçoit en mettant le doigt sur l'une d'elles,

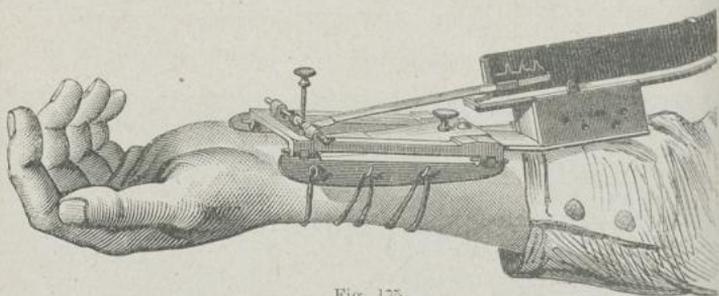


Fig. 175.

et qui est désigné sous le nom de pouls, est dû au gonflement et au durcissement subit de l'artère sous l'influence du passage de l'onde sanguine.

On sait que pour bien sentir ce pouls il faut légèrement écraser une artère sur un plan résistant, alors tout l'effet de la projection du sang se fait contre le doigt de l'observateur.

Remplaçons maintenant le doigt par un léger ressort convenablement réglé, ce ressort sera repoussé à chaque pulsation et nous

pourrons en inscrire les déplacements. C'est là l'origine du sphygmographe. Le premier appareil de ce genre, a été imaginé par Vierordt, mais les pièces à mouvoir avaient une telle inertie que le tracé obtenu était complètement déformé. Le meilleur modèle que nous ayons actuellement est celui de Marey. La figure 174 est un schéma simple à comprendre à l'inspection de la figure et donnant la théorie de l'appareil; la

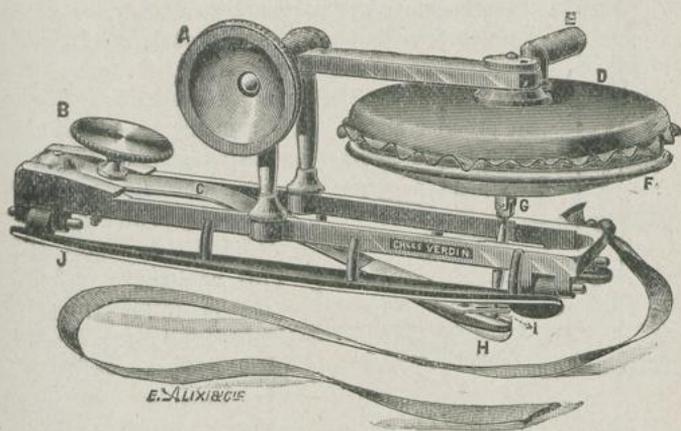


Fig. 176.

figure 175 montre le sphygmographe tel qu'il doit être appliqué sur le bras.

L'enregistrement se fait sur un papier enfumé tendu sur un petit cadre entraîné par un mouvement d'horlogerie. Une vis permet de régler la pression du ressort sur l'artère. Suivant le degré de pression la courbe enregistrée se modifie, et c'est là le grand écueil de la sphygmographie, dans l'état actuel de la question. Deux personnes se servant du même appareil sur un même sujet ne trouvent pas forcément le même tracé.

Lorsqu'on veut prolonger un certain temps l'enregistrement, le sphygmographe direct devient insuffisant, car la bande de papier arrive vite au bout de sa course. On prend alors le sphygmographe à transmission; le ressort, au lieu d'agir directement sur le style, vient comprimer la membrane d'un tambour de Marey (fig. 176), ce tambour sera relié à un récepteur suivant le procédé connu.

Si l'on veut faire de la sphygmographie, il y a lieu actuellement de n'employer que l'instrument de Marey qui est bien combiné et construit dans de bonnes conditions, les instruments similaires ont généralement trop d'inertie et faussent les indications, ainsi que nous nous en sommes assuré. Il faut surtout se méfier du type de Dudgeon (fig. 177), où les mouvements du ressort appuyé sur la radiale en F se transmettent à un système de leviers assez compliqué, et auquel la présence d'une petite boule C donne une inertie considérable. Cet appareil est très séduisant au premier abord, facile à mettre en place, mais il est le plus inexact des instruments de ce genre.

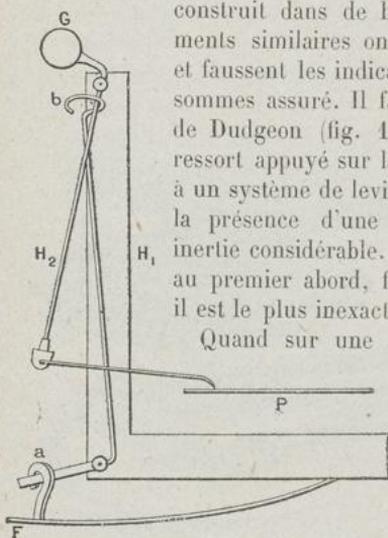


Fig. 177.

Quand sur une personne normale, on prend un tracé avec un bon sphygmographe de Marey (fig. 178), ce tracé se présente sous la forme suivante. D'abord il y a une brusque ascension, puis une descente plus lente, sur laquelle on observe plusieurs ondulations, dont l'une *d* est plus importante que les autres : *d* correspond à ce que l'on appelle le dicrotisme du pouls. La brusque ascension du début *b* correspond à l'arrivée de l'onde, lancée

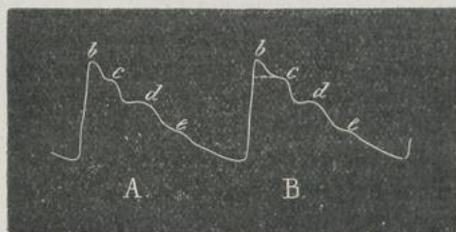


Fig. 178.

par le cœur. On attribue généralement le dicrotisme *d* à une réflexion de l'onde primaire. A la fin de la systole ventriculaire, après que l'aorte s'est dilatée sous l'influence de l'afflux sanguin venant du cœur, le sang tend à revenir vers cet organe. Mais les valvules sigmoïdes se ferment, il en résulte un choc contre ces

valvules et la production d'une ondulation donnant lieu au dirotisme.

Contrairement à ce que l'on pourrait penser au premier abord, la hauteur des tracés sphygmographiques ne croît pas avec la pression sanguine, au contraire. Si, dans les mêmes conditions, on voit l'amplitude d'un tracé augmenter, la pression sanguine a diminué. Cela peut tenir à diverses causes parmi lesquelles il y en a une facile à concevoir; plus la pression est haute, plus l'artère est déjà distendue et moins une même onde fera varier son calibre; or ce sont précisément ces variations seules que l'on inscrit.

Naturellement le pouls n'est pas synchrone de la pulsation cardiaque, il y a un retard d'autant plus prononcé que l'artère explorée est plus éloignée du cœur. De plus l'onde ne commence à se produire qu'au moment de l'ouverture des valvules sigmoïdes, et cette ouverture n'a lieu, comme nous le savons, qu'un moment après le début de la systole. Autrement dit, entre le moment où le ventricule commence sa systole et celui où le pouls se fait sentir, il y a : 1° une période de compression jusqu'à l'ouverture des valvules sigmoïdes; 2° une durée de propagation depuis le cœur jusqu'au point exploré.

La période de compression varie suivant les auteurs; mais elle ne dépasse pas 0,1 (Chauveau et Marey). Quant à la vitesse de propagation de l'onde, elle est estimée à 8 ou 9 m. par seconde dans les grosses artères. On voit immédiatement que cette propagation du pouls ne peut être confondue avec la vitesse du sang qui n'est que de 0 m. 25 à 0 m. 30 par seconde.

Dans diverses maladies on voit la forme du pouls se modifier, malheureusement jusqu'ici cette étude a été fort mal faite, les divers instruments dont on s'est servi n'étant nullement comparables entre eux; elle serait tout entière à reprendre.

Pléthysmographie.

La pulsation cardiaque ne se fait pas sentir uniquement dans les gros vaisseaux, ses effets se propagent jusque dans les capillaires, il en résulte une variation de volume périodique des organes. De plus on sait que le calibre des petits vaisseaux varie sous l'effet des nerfs vaso-moteurs, de ce chef il résulte aussi une variation

de volume des organes. L'étude de ces variations est très intéressante, elle se fait au moyen des pléthysmographes ou des onco-graphes.

Dans les pléthysmographes on enferme l'organe à étudier dans

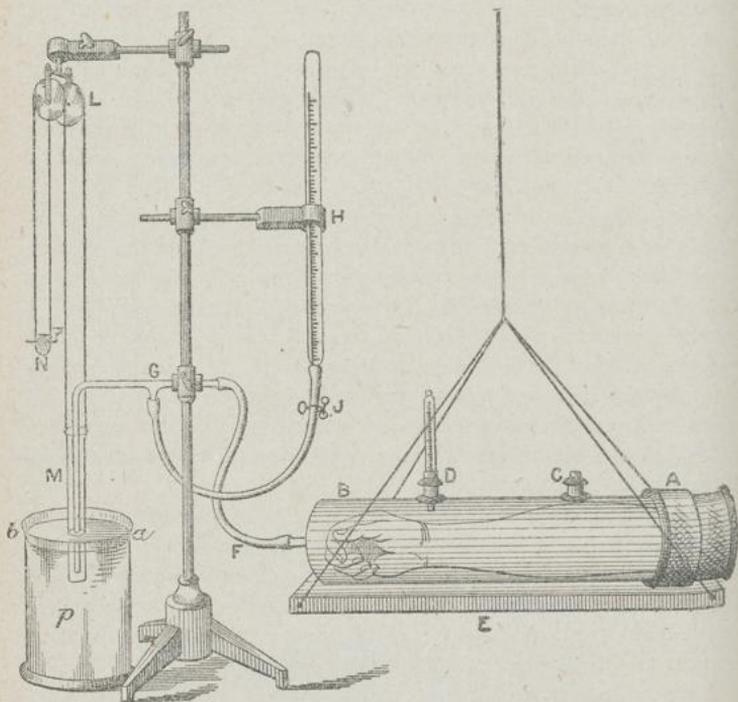


Fig. 179.

une cavité close reliée à un tambour de Marey ou un enregistreur analogue.

Dans les onco-graphes on prend l'organe entre les valves appropriées dont l'une sera fixe, l'autre mobile, munie d'un levier enregistreur ou agissant sur une transmission.

La figure 179 représente le pléthysmographe de Mosso. Il consiste en un gros tube E dans lequel on introduit le bras, en A une garniture de caoutchouc permet de clore hermétiquement l'appareil que l'on remplit d'eau par C. Les variations de volume produisent un écoulement ou une aspiration dans une éprouvette M suspendue

sur deux poulies avec contrepoids et dont on enregistra les déplacements par un petit style fixé en N,

On peut détacher en partie un organe ou une portion d'organe

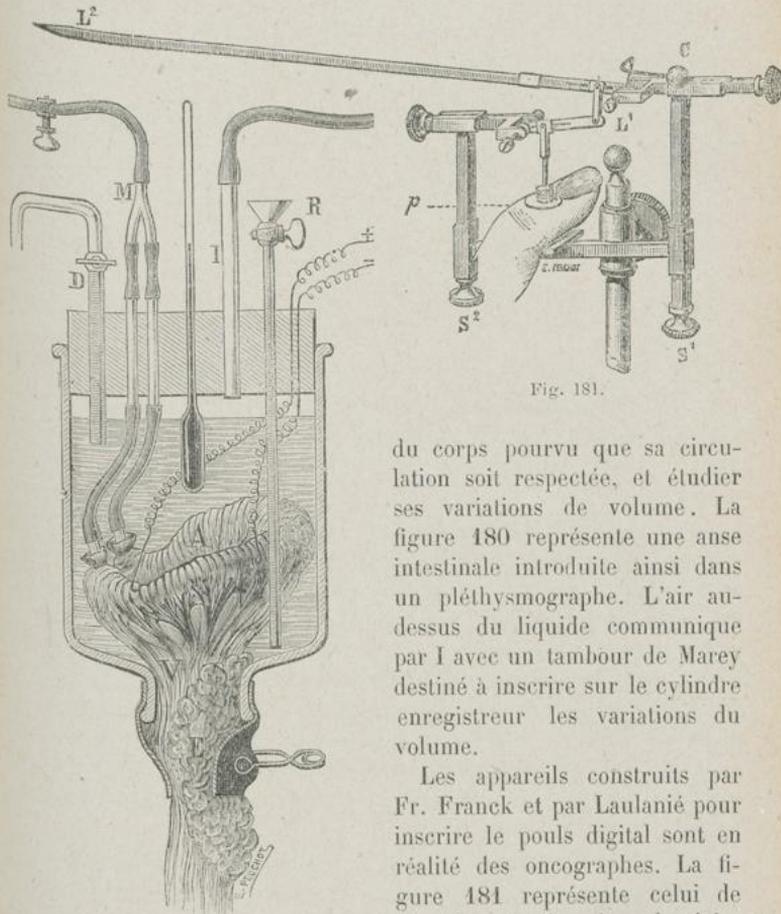
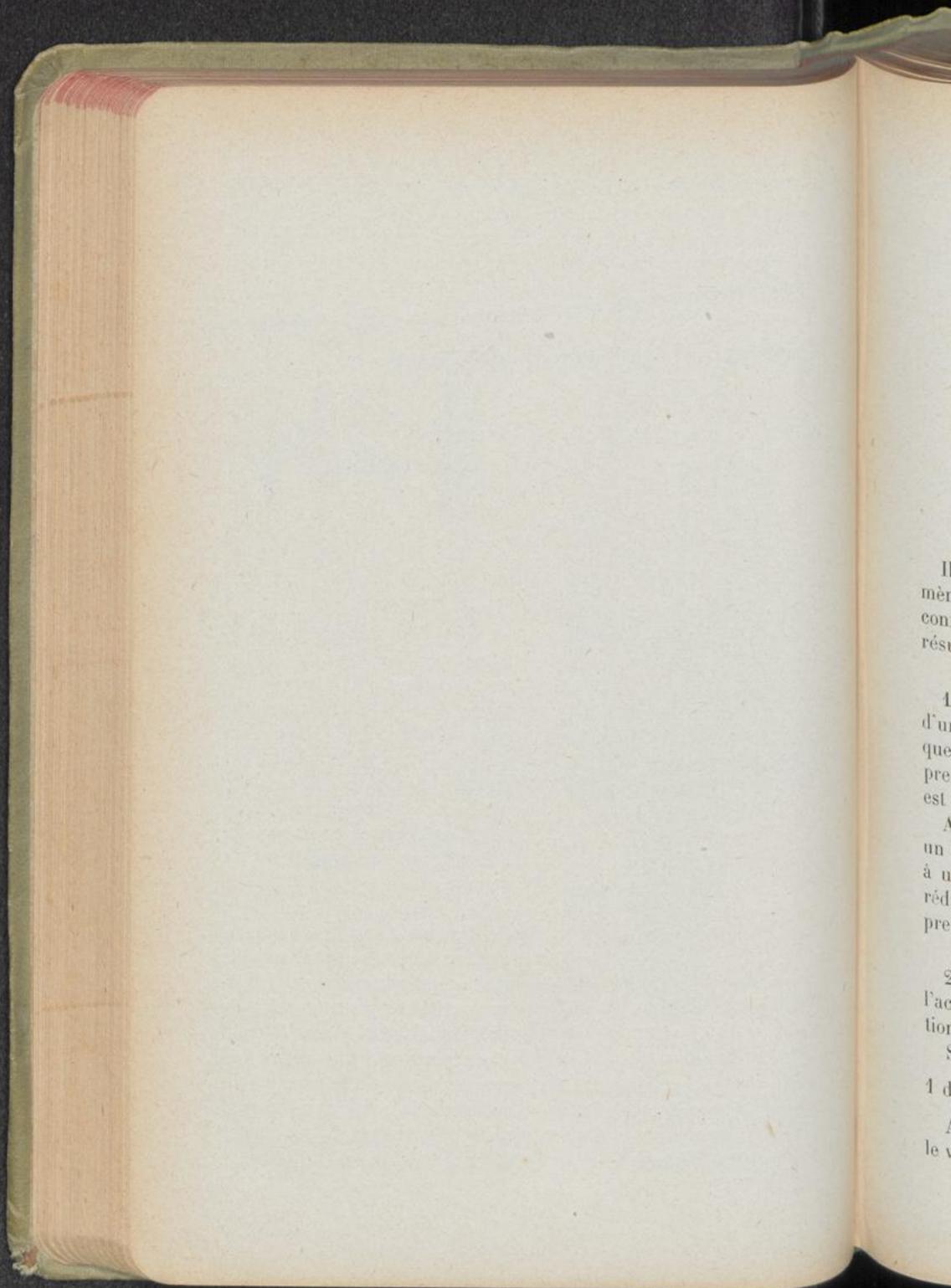


Fig. 181.

du corps pourvu que sa circulation soit respectée, et étudier ses variations de volume. La figure 180 représente une anse intestinale introduite ainsi dans un pléthysmographe. L'air au-dessus du liquide communique par I avec un tambour de Marey destiné à inscrire sur le cylindre enregistreur les variations du volume.

Les appareils construits par Fr. Franck et par Laulanié pour inscrire le pouls digital sont en réalité des oncographes. La figure 181 représente celui de Fr. Franck. On place le doigt sur un support fixe, la valve mobile de l'oncographe peut être figurée par une petite lame métallique ou par l'ongle sur lequel on appuie le levier enregistreur.

Cet instrument est d'un maniement très simple et peut donner d'excellents tracés.



Il
mèr
con
rés

4
d'un
que
pre
est
A
un
à u
ré
pre

2
l'ac
tion
S
1 d
A
le v