drait pour cela introduire dans une artère la canule d'un hémomanomètre. Mais il est possible d'arriver au même résultat par une voie détournée. M. Marey, mettant à profit les recherches récentes de M. Mosso sur les changements de volume des organes périphériques dans leurs rapports avec la circulation (Voy. § 108 *bis*), détermine la pression du sang dans les artères des membres en établissant à leur surface une contre-pression graduellement croissante et capable de faire équilibre à la tension sanguine. Cette contre-pression égale et contraire, et dont on connaît à chaque moment la valeur, est naturellement la mesure de la tension sanguine qu'elle équilibre. Dans une caisse métallique munie de deux tubulures et remplie d'eau, on introduit la main et l'avant-bras. Un manchon de caoutchouc ferme hermétiquement l'orifice de la caisse autour de la partie supérieure de l'avant-bras. La cavité de la caisse est mise en communication avec un réservoir d'eau mobile sur une glissière et qui peut être élevé à volonté à l'aide d'une manivelle. Il arrive un moment où la contre-pression est suffisante pour faire équilibre à la tension artérielle. Cette contre-pression a varié, dans les expériences de M. Marey, entre 12 et 17 centimètres de mercure; soit en moyenne environ 15 centimètres.

La tension du sang est à peu de chose près la même dans tous les points de l'arbre artériel; en tant du moins qu'il n'est question que des artères volumineuses. M. Poiseuille a trouvé que, quelle que fût l'artère où il plaçait son tube, la tension était la même. MM. Ludwig et Spengler n'ont aperçu, entre la tension du sang de l'artère carotide du cheval et celle du métatarse du même animal, que des différences de peu d'importance [1].

Il n'en est pas tout à fait de même quand on expérimeute sur de *petites artères*. L'ondée artérielle lancée par la contraction ventriculaire perd, en effet, une partie de sa force à mesure qu'elle progresse dans ses canaux élastiques; et cela en vertu des frottements, des courbures et des divisions vasculaires. Aussi, quand on place en même temps un hémodynamomètre dans une grosse artère voisine du cœur, et un hémodynamomètre dans un petit rameau de la même artère, il y a un excédant de pression en faveur de l'artère volumineuse. Si dans les artères d'*un certain calibre* la tension est sensiblement la même, près du cœur et loin du cœur, c'est que la perte due au frottement, aux courbures et aux divisions, peut être ici (vu la proportion de la masse liquide en mouvement) envisagée comme à peu près nulle.

En un point quelconque des grosses artères la pression du sang sur les parois (estimée en colonne de mercure) est donc égale à la surface de la paroi que l'on considère, multipliée par 15 centimètres. De même, une tranche liquide, prise par la pensée dans une artère, est pressée de toutes parts par un poids égal à la surface de section de l'artère, multipliée par une colonne de 15 centimètres de mercure.

De là, il est facile de déduire en chiffres quelle est la pression statique exercée par le sang sur les valvules sigmoïdes, à l'orifice aortique.

[1] Deux hémodynamomètres placés en même temps, l'un dans la carotide du veau, l'autre dans l'artère métatarsienne, ont donné, le premier une élévation de 16 centim. de mercure, l'autre une élévation de 14 cent. 1/2. M. Volkmann a trouvé entre la tension de l'artère carotide et celle de l'artère crurale du chien une petite différence en sens contraire. Ces légères différences observées dans les artères d'un certain volume, tiennent à des conditions passagères de la circulation, car il n'est pas rare de les voir renversées; c'est ce qu'on peut constater chaque jour dans les laboratoires.

Ainsi, par exemple, le rayon d'ouverture de l'artère aorte, près du cœur, sur un chien de moyenne taille, étant de $7^{mm},25$, le poids supporté par les valvules sigmoïdes est représenté par une colonne de mercure de 15 centimètres (ou par une colonne de sang de $2^{m},2$) d'élévation et de $7^{mm},25$ de rayon, c'est-à-dire par une colonne de sang pesant 345 grammes. Sur l'homme, le rayon d'ouverture de l'aorte près du cœur est de 16 millimètres, le poids supporté par les valvules sigmoïdes est donc représenté par une colonne de mercure de 15 centimètres (ou par une colonne de sang de $2^{m},2$) d'élévation et de 16 millimètres de rayon, c'est-à-dire par une colonne pesant $1^{k},720$. L'ouverture de l'aorte, près du cœur, ayant pour rayon 16 millimètres, a pour aire 8 centimètres carrés (l'aire du cercle est égale au produit de la circonférence par la moitié du rayon); donc, chaque centimètre carré de surface des valvules supporte une pression qui est la huitième partie de $7^{k},720$, c'est-à-dire 215 grammes. La tension étant sensiblement la même dans tous les gros vaisseaux artériels, ainsi que nous venons de le voir, cette pression de 215 grammes s'exerce sur chaque centimètre carré pris à la surface intérieure des artères.

Au moment de la systole ventriculaire, le flot liquide introduit dans l'arbre artériel exagère passagèrement la tension du sang. Sur l'hémomanomètre introduit dans une artère, l'influence de chaque contraction ventriculaire se fait sentir par une élévation intermittente dans e niveau du mercure. Ces mouvements de la colonne mercurielle sont donc isochrones et avec les pulsations du cœur et avec le pouls artériel. A chaque systole ventriculaire, la colonne mercurielle s'élève de 1/2 à un centimètre. Sur les petits animaux, l'élévation systolique du sang dans l'hémomanomètre n'est souvent que de quelques millimètres.

La tension additionnelle due à chaque systole ventriculaire n'est pas uniformément répandue dans tout l'arbre artériel. Cette tension additionnelle qui, en définitive, n'est que la trentième ou la quinzième partie de la tension totale, est plus marquée dans les vaisseaux qui avoisinent le cœur que dans les vaisseaux plus éloignés. L'ondée sanguine projetée dans le tube artériel élastique perd, en effet, une partie de sa puissance, en vertu des résistances diverses qu'elle rencontre (Voy. § 97), et ces résistances s'additionnent les unes aux autres, à mesure qu'on s'éloigne du cœur.

La tension du sang dans l'arbre artériel varie encore dans les mouvements d'inspiration et d'expiration. Ces variations peuvent être constatées à l'aide de l'hémomanomètre, et elles prouvent l'influence qu'exercent les mouvements de la respiration sur la circulation du sang. A l'article de la circulation veineuse, nous montrerons comment, à chaque inspiration, la circulation des troncs veineux qui avoisinent le cœur se trouve accélérée. Il n'est pas question ici des veines, mais des artères. La diminution de tension dans l'arbre *artériel*, au moment de l'inspiration est déterminée par l'influence que le jeu de soufflet de la poitrine exerce sur l'énergie des contractions ventriculaires du cœur et sur la capacité de l'aorte thoracique. Au moment de l'inspiration, en effet, la tendance au vide qui a lieu dans l'intérieur de la poitrine tend à paralyser les contractions des ventricules, par effort excentrique, en même temps qu'elle tend à augmenter la capacité de l'aorte. Aussi voit-on, dans l'hémomanomètre fixé dans les artères carotides, le niveau du mercure s'abaisser pendant les mouvements d'inspiration et s'élever pendant l'expiration. Ces oscillations ne peuvent être confondues avec celles dues à la systole ventriculaire. Elles sont lentes comme le flux et le reflux

des mouvements respiratoires, et se produisent seulement 15 ou 18 fois par minute, de même que la respiration elle-même, tandis que les oscillations dues aux contractions du cœur sont saccadées, et se produisent, comme ces contractions, 75 ou 80 fois dans le même espace de temps.

L'oscillation de tension déterminée par les mouvements respiratoires est plus étendue que l'oscillation amenée par la systole du cœur. De plus, l'oscillation de tension due à la respiration diminue rapidement à mesure qu'on s'éloigne de la poitrine, ce qui prouve que sa cause doit être attribuée à l'action du vide thoracique sur la contraction des ventricules du cœur et sur la capacité de l'aorte pectorale. MM. Ludwig et Spengler ont simultanément introduit un hémomanomètre dans l'artère carotide d'un cheval et un hémomanomètre dans l'artère du métatarse du même animal. Or, tandis que l'oscillation respiratoire faisait mouvoir alternativement la colonne mercurielle, dans une étendue de 5 à 6 centimètres dans l'artère carotide ; dans l'artère du métatarse, le chemin parcouru par la colonne mercurielle, pendant les mouvements de la respiration, ne dépassait pas un centimètre [1].

La tension du sang dans le cercle artériel de la petite circulation est (comme on devait le prévoir) moins considérable que celle de la grande circulation, dont il a été jusqu'ici exclusivement question.

MM. Ludwig et Beutner ont mesuré, sur le chien, le chat et le lapin, la différence de tension du sang dans les deux cercles circulatoires. A cet effet, ils introduisent dans la branche gauche de l'artère pulmonaire de l'animal en expérience le tube d'un hémomanomètre, et dans l'artère carotide du même animal un autre hémomanomètre. De leurs expériences il résulte qu'en moyenne la tension du sang dans l'artère pulmonaire est à la tension du sang dans l'artère carotide : : 1 : 3. Il est vrai que, dans ces expériences, la poitrine était ouverte et qu'on entretenait *artificiellement* la respiration; or cette opération change peut-être un peu le rapport normal. Il ne ressort pas moins de ces expériences que la différence observée est en relation évidente avec la force inégale du ventricule gauche et du ventricule droit. Rappelons, en effet, que l'origine première de la tension du sang dans les artères réside dans la contraction du cœur; or, la puissance musculaire du ventricule droit est moindre que celle du ventricule gauche (Voy. § 95).

La colonne mercurielle équilibrée par la tension artérielle éprouve, ainsi

[1] M. Einbrodt a remarqué que les mouvements respiratoires ordinaires n'ont pas d'influence sensible sur la tension sanguine des artères des membres; que dans les inspirations fortes, il y a diminution de tension au commencement, puis augmentation à la fin ; que dans l'expiration qui suit, il y a augmentation de tension au commencement, puis diminution à la fin. M. Marey a étudié ces phénomènes de plus près, et il a montré que le *mode* de respiration exerce une influence déterminante sur ces oscillations. Dans la respiration lente et profonde avec la bouche fermée et une seule narine ouverte, l'oscillation de tension du sang des artères (de la radiale) se fait dans le sens indiqué par M. Ludwig. Lorsqu'au contraire on respire largement et très rapidement avec la bouche et les narines ouvertes, l'oscillation de tension est renversée ; il y a augmentation de tension pendant l'inspiration et diminution pendant l'expiration. M. Marey fait observer que ces effets dépendent des alternatives de pression auxquelles se trouvent soumises, soit l'aorte abdominale, soit l'aorte pectorale, dans les divers modes de respiration. Dans l'inspiration rapide avec la bouche et les narines grandes ouvertes, la pénétration de l'air est facile, il n'y a pour ainsi dire point d'appel dans la poitrine, le diaphragme s'abaisse sur les viscères abdominaux, et l'aorte abdominale comprimée refoule en quelque sorte le sang dans les artères périphériques. Dans l'inspiration laborieuse, la tendance au vide qui a lieu dans la poitrine prédomine sur l'influence comprimante qu'exerce le diaphragme du côté de l'abdomen; il y a appel de l'aorte pectorale et tendance au flux sanguin vers la poitrine.

que nous venons de le voir, deux sortes d'oscillations au-dessus et au-dessous de sa position moyenne d'équilibre : les unes sont isochrones avec les pulsations du cœur, les autres sont isochrones avec les mouvements respiratoires. Ces oscillations, faciles à constater à l'aide de l'instrument de M. Poiseuille, ne peuvent guère être *mesurées* avec cet instrument. M. Ludwig, pour arriver à des mensurations précises, a imaginé de compléter l'hémomanomètre par un appareil auquel il a donné le nom de *kymographe*. Cet appareil complémentaire a été employé, depuis M. Ludwig, par la plupart des physiologistes qui se sont occupés des phénomènes de la circulation [1]. Le kymographe n'est autre chose qu'un hémomanomètre *enregistreur*. Il est essentiellement constitué par un cylindre A (Voy. fig. 50), auquel on imprime un mouvement circulaire uniforme à l'aide d'un mécanisme d'horlogerie renfermé dans la caisse B. L'hémomanomètre annexé au kymographe contient, dans le tube d'ascension du mercure, une tige métallique *ff* terminée par un disque flotteur qui repose sur le sommet de la colonne mercurielle. Cette tige mobile suit les mouvements d'élévation et d'abaissement de la colonne mercurielle *h* sur laquelle elle repose, et elle porte un appendice horizontal sur lequel est fixé un crayon *e*. On conçoit facilement le jeu de l'appareil. Le cylindre A, recouvert d'une feuille de papier blanc et animé d'un mouvement circulaire uniforme, présente successivement au crayon les divers points de sa circonférence, et les mouvements d'élévation et d'abaissement de la colonne mercurielle *h* se trouvent ainsi représentés sur le papier du cylindre A par une ligne onduleuse dont les sommets des courbes représentent les maxima des excursions. Cet instrument permet de mesurer, avec une grande précision, et les excursions respiratoires, et les excursions systoliques de la colonne mercurielle. Ces dernières, étant *moins étendues* et *plus fréquentes* que les excursions respiratoires, se trouvent représentées sur le parcours de la courbe par des ondulations plus petites.

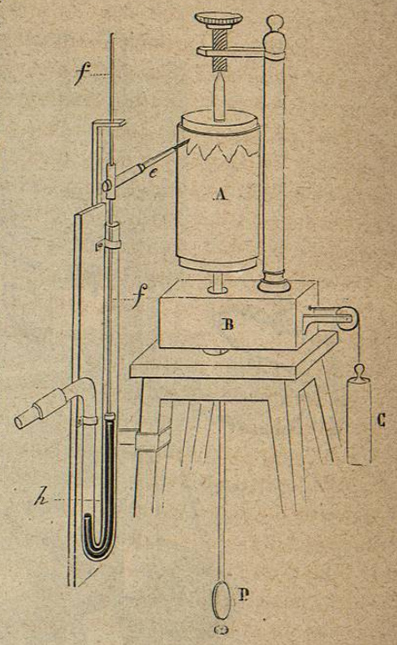

Fig. 50.

Kymographe de Ludwig (hémodynamomètre avec cylindre enregistreur).

M. Ludwig est le premier qui ait utilisé le mouvement d'un cylindre animé d'un mouvement circulaire uniforme pour y recueillir le tracé d'un mouvement transmis à l'aide d'une tige armée d'un style ou d'un crayon.

A, cylindre animé d'un mouvement circulaire.
B, caisse renfermant un mécanisme d'horlogerie.
C, poids servant de moteur au mécanisme d'horlogerie.
D, pendule ou balancier servant de régulateur au mouvement.
e, crayon.
ff, tige métallique terminée inférieurement par un disque reposant sur le mercure.
h, colonne mercurielle de l'hémodynamomètre.

[1] Le cylindre enregistreur du *cardiographe* de MM. Chauveau et Marey (fig. 42, page 220) ainsi que le kymographe de M. Valentin (fig. 51, page 248) et que le cylindre enregistreur de M. Marey (fig. 52, page 249) ne sont que le kymographe de Ludwig perfectionné.

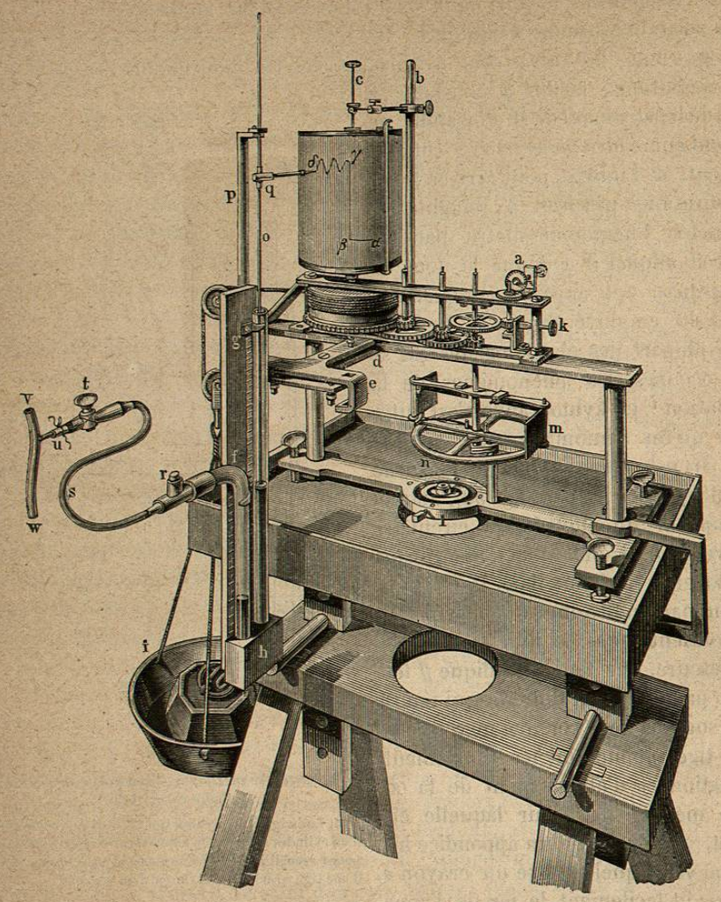

Fig. 51.

Kymographe de Valentin (hémodynamomètre avec cylindre enregistreur).

$\alpha\beta\gamma\delta$, cylindre mis en rotation par un appareil d'horlogerie.
b, tige supportant un *directeur* mobile à glissement, lequel sert de coussinet à la tige *c*.
d, règle horizontale sur laquelle peut glisser la tablette *e*.
e, tablette à laquelle est fixé l'hémodynamomètre *fgh*.
i, plateau chargé de poids, destiné à imprimer le mouvement à l'appareil d'horlogerie.
k, vis de pression qui arrête le mouvement ou qui lui rend la liberté.
l, pièce pouvant recevoir un pendule ou balancier.
mn, appareil régulateur du mouvement d'horlogerie. Cet appareil est analogue à celui de nos pendules.
o, tige du flotteur placé sur le mercure.
p, pièce présentant à sa partie supérieure un guide destiné à maintenir la tige du flotteur dans la direction verticale.
q, porte-crayon ou porte-pinceau.
r, ouverture fermée par un bouchon, et par laquelle on introduit dans l'hémodynamomètre la solution de sulfate de soude.
s, tube métallique à parois minces, mais légèrement flexible.
t, robinet.
u, canule d'introduction.
vw, vaisseau artériel en expérience.

L'axe de rotation sur lequel est fixé le cylindre $\alpha\beta\gamma\delta$ n'est pas seul. Il existe encore trois autres axes verticaux de rotation placés sur la règle *d*, reliés au mouvement d'horlogerie par des roues d'engrenage, et sur lesquels on peut fixer d'autres pièces tournantes. Lorsque ces pièces doivent exécuter un mouvement de rotation dans le sens *horizontal*, on les fixe sur l'axe de la roue d'angle *a*.

Au lieu d'une feuille de papier blanc, on peut entourer le cylindre d'une feuille recouverte de noir de fumée, et remplacer le crayon *e* par une pointe métallique, ou par une lamelle très mince de baleine taillée en pointe; on obtient ainsi un dessin plus net et plus fin.

La figure 51 représente un appareil du même genre qu'a fait construire M. Valentin, et qu'on peut d'ailleurs utiliser à d'autres recherches de physiologie.

La figure 52 représente le cylindre enregistreur de M. Marey. C'est celui qui est en usage aujourd'hui dans la plupart des laboratoires de physiologie. Le cylindre est mû non par des poids, mais par un ressort de pendule et son mouvement circulaire est rendu uniforme à l'aide d'un régulateur. Ce cylindre est placé sur un support à plateau mobile; il peut être élevé ou abaissé à volonté à l'aide d'une manivelle, de manière à être mis en rapport avec le style enregistreur partout où les nécessités de l'expérience l'exigent.

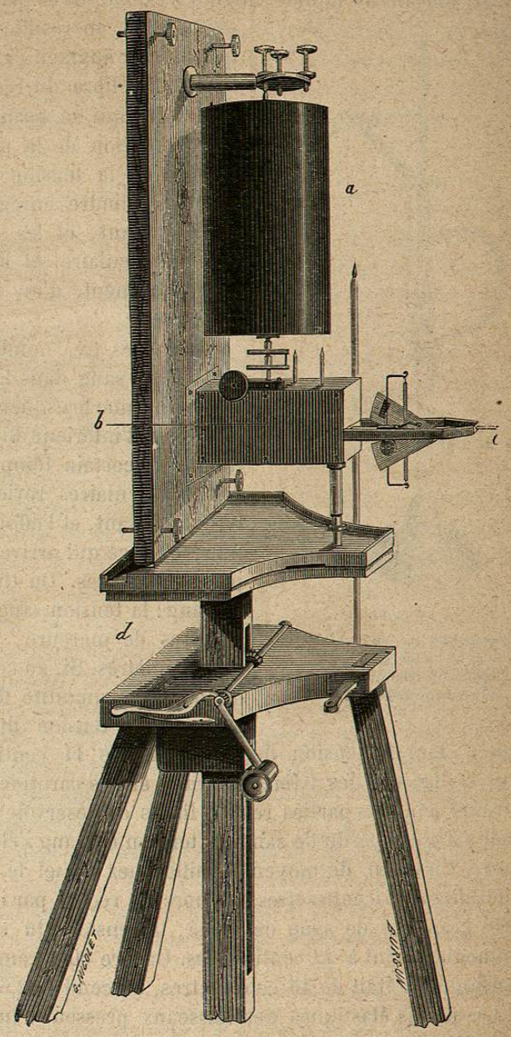

Fig. 52.

Cylindre enregistreur de M. Marey.

a, cylindre métallique sur lequel on enroule une feuille de papier recouverte de noir de fumée.
b, boite renfermant le mouvement d'horlogerie qui communique au cylindre un mouvement circulaire uniforme.
c, régulateur du mouvement.
d, support à crémaillère permettant, à l'aide d'une manivelle, d'élever ou d'abaisser l'appareil et de mettre en rapport le style enregistreur avec la surface du cylindre tournant.

Le kymographe ou hémomanomètre enregistreur de M. Fick représenté figure 53, est tout à fait différent des appareils qui précèdent. Il est basé sur le principe sur lequel repose le baromètre anéroïde. La canule qui termine le tube flexible de l'appareil est introduite, comme la canule de l'hémomanomètre à mercure, dans le vaisseau artériel dont on veut mesurer la tension. Le liquide sanguin pénètre par le tube flexible dans un ressort creux circulaire aplati et fermé à son extrémité.

Il rencontre dans ce ressort creux une dissolution de sulfate de soude qui y a été introduite d'avance et qui est destinée à retarder la coagulation.

La tension du liquide sanguin s'exerce sur les parois intérieures de ce ressort creux, et il en résulte un mouvement d'expansion qui tend à augmenter son rayon de courbure. A l'extrémité libre du ressort est annexé un système de leviers qui se termine par un style. Le degré de locomotion de la partie libre du ressort est la mesure de la tension sanguine. On peut inscrire sur un cylindre enregistreur, mis au contact du style écrivant, et les oscillations dues à la systole ventriculaire, et les oscillations respiratoires. Cet instrument, d'un maniement difficile, est peu en usage.

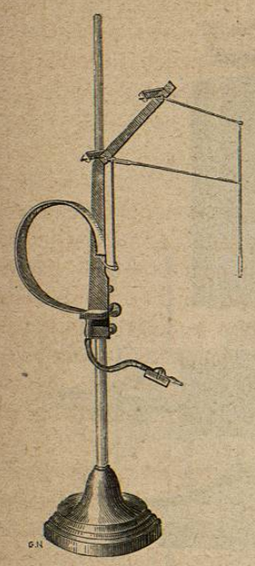

Fig. 53.

Kymographe de Fick (hémodynamomètre basé sur un principe analogue à celui sur lequel repose le baromètre anéroïde).

Des causes très nombreuses peuvent modifier la tension du sang dans les vaisseaux artériels. Lorsqu'on diminue brusquement la quantité de sang contenue dans l'intérieur du système circulatoire, comme il faut un certain temps pour qu'il se régénère, les parois vasculaires reviennent par élasticité sur le liquide restant, et l'effort excentrique du sang diminue ; c'est ce qui arrive dans toutes les saignées un peu abondantes. On tire à un chien 500 grammes de sang : la tension sanguine, qui équilibrait 13 centimètres de mercure, descend immédiatement à 11 centimètres. Si, au contraire, on augmente brusquement la quantité de sang qui circule dans les artères, la tension du sang augmente. Sur un chien dont la tension du sang était de 11 centimètres de mercure, si on fait la ligature des artères crurales et des carotides, la quantité de liquide qui circule dans les parties restées libres du réservoir artériel augmente, car l'animal n'a point perdu de sang : la tension du sang s'élève à 12 centimètres de mercure. Un chien de moyenne taille chez lequel le sang de la carotide faisait équilibre à 15 centimètres de mercure reçoit, par injection, dans ses vaisseaux 500 grammes de sang défibriné ; la tension du sang de la carotide s'élève immédiatement à 22 centimètres. On tire 600 grammes de sang à un chien, la tension, qui était de 15 centimètres, descend à 12,5, etc.

Les parois élastiques des vaisseaux pressent d'une manière continue sur le liquide qu'ils renferment comme un ressort toujours bandé et le poussent dans la seule voie ouverte, celle des capillaires. M. Marey fait observer que pour l'interprétation des mesures manométriques de la tension artérielle on oublie trop souvent que cette tension est soumise à deux influences antagonistes : 1° d'une part, l'action impulsive du cœur qui pousse le sang avec plus ou moins de force ; 2° l'action des petits vaisseaux qui suivant leur état de resserrement ou de relâchement le laissent plus ou moins facilement passer dans les veines. Il en résulte que la tension artérielle peut s'élever dans deux circonstances déterminées : d'une part, lorsqu'il y a accroissement de la force du cœur ; d'autre part, lorsqu'il y a augmentation de résistance des petits vaisseaux. De même, elle peut diminuer dans deux circonstances distinctes : d'une part, quand il y a affaiblissement de l'action du cœur ; d'autre part, lorsqu'il y a relâchement des petits vaisseaux.

Les variations de calibre des vaisseaux sont sous l'influence de la tunique musculaire qui entre dans leur constitution ; or la contraction ou le relâchement de ces tuniques musculaires tout aussi bien que les variations dans l'énergie des mouvements du cœur sont sous la dépendance du système nerveux [1].

§ 95.

Force de contraction du cœur. — Le cœur est composé par des plans charnus épais : c'est un muscle puissant. Il suffit de saisir entre ses mains les ventricules du cœur d'un animal dont on vient d'ouvrir la poitrine pour constater, par la rigidité et la dureté des parois, au moment de la systole, qu'ils exercent sur le sang une pression énergique ; on peut aussi introduire le doigt dans l'intérieur des ventricules, et on sent en ce moment une compression assez vive. On peut encore placer des poids sur la partie moyenne du cœur d'un animal vivant, et remarquer qu'à chaque systole ventriculaire, la fibre musculaire, en se raccourcissant et en se tuméfiant, les soulève.

Nous avons dit, il y a un instant, que la tension ou pression exercée par le sang dans les vaisseaux artériels de la grande circulation pouvait être évaluée, en moyenne, à 215 grammes par centimètre carré de surface. Or, lorsque la systole ventriculaire fait pénétrer le sang dans l'aorte, en refoulant les valvules sigmoïdes du côté de l'artère, la cavité du cœur communique en ce moment avec la cavité artérielle : il y a une continuité momentanée entre le ventricule et l'aorte. La pression *statique* qui existait dans l'aorte, existe alors aussi dans le cœur ; elle est représentée pareillement ici par une pression de 215 grammes par centimètre carré de surface. Pour une *surface égale* prise à l'intérieur des artères ou à l'intérieur du cœur, cette pression statique est égale ; elle est répartie sur chaque unité de surface du cœur de la même manière que sur chaque unité de surface artérielle.

La surface interne du ventricule gauche du cheval ayant, d'après M. Colin, 565 centimètres carrés de surface, *prise dans son ensemble*, supporte, au moment de la systole ventriculaire, une pression de (565×215) 121 kilogrammes. Ajoutons qn'une surface *de la même étendue* prise à l'intérieur des artères supporte une égale pression.

Quelques physiologistes semblent croire que la force dépensée par les ventricules pour faire passer l'ondée sanguine dans l'arbre artériel et pour lui imprimer le mouvement, est équivalente à la pression qui s'exerce, à la surface interne du cœur, au moment de la systole, et que la valeur de cette force peut être représentée par cette pression : c'est là une erreur. Le calcul précédent ne donne que la mesure de pression que le ventricule a à supporter comme dépendance du système vasculaire, et cela en dehors de tout *travail* effectué. Or, non seulement le cœur supporte le poids d'une masse de sang représentée par une colonne d'une certaine élévation, mais encore il lui imprime en même temps le

[1] Toutes ces questions complexes seront examinées avec le développement qu'elles méritent au chapitre de l'innervation.