

longueur *ab*, la puissance contractile a précisément fait équilibre au poids extenseur. Le poids qu'il faut ajouter au muscle pour arriver à ce résultat est la mesure de ce que M. Weber appelle la *puissance d'équilibre*. La puissance d'équilibre varie nécessairement avec les muscles mis en expérience, car la longueur de distension varie avec la masse musculaire, par chaque centimètre carré de section du muscle. Le poids qui fait équilibre à la puissance contractile est généralement trente fois le poids du muscle en expérience.

De ce qu'un muscle chargé d'un faible poids se raccourcit plus que le même muscle chargé de poids plus considérables, il ne faut cependant pas en inférer que le maximum de force déployée par le muscle qui se contracte correspond toujours au poids le plus faible. Ce maximum dépend aussi de la grandeur de l'allongement amené dans le muscle par le poids tenseur, et il est représenté par le rapport qui existe entre ces deux quantités. Ainsi, par exemple, dans l'expérience citée précédemment, un muscle (hyoglosse de grenouille) chargé de 2 grammes, et ayant une longueur de 33^{mm},8, s'est raccourci de 25^{mm},8, au moment de la contraction. Le même muscle, chargé de 10 grammes, ayant alors une longueur de 40^{mm},4, s'est raccourci de 18^{mm},5. Le même muscle, chargé de 20 grammes, et ayant une longueur de 44^{mm},5, s'est raccourci de 1^{mm},6. Le même muscle, chargé de 30 grammes, et ayant une longueur de 47^{mm},5, ne s'est raccourci que de 0^{mm},6. Dans le premier cas, la quantité du travail¹ est représentée par 52; dans le second cas, par 185; dans le troisième, par 32; dans le quatrième, par 30. Il résulte de là que l'effet maximum de la contraction ne correspond ni au poids le plus faible, ni au poids le plus fort, mais, dans l'espèce, au poids moyen de 10 grammes. Ce principe est fertile en applications au travail des moteurs animés².

¹ La *quantité de travail* s'obtient en multipliant le poids soulevé (ce sont les poids ajoutés au muscle) par le chemin parcouru (le chemin parcouru, c'est le degré de raccourcissement du muscle). Ainsi, $2 \times 25,8 = 52$; $10 \times 18,5 = 185$; $20 \times 1,6 = 32$; $30 \times 0,6 = 18$.

L'unité dynamique, ou *kilogrammètre*, est représentée par l'élévation d'un corps pesant 1 kilogramme à 1 mètre de hauteur, et, par conséquent, le *grammillimètre* est représenté par l'élévation d'un corps pesant 1 gramme à 1 millimètre de hauteur. On peut donc dire que, dans le premier cas, la *force déployée* par le muscle est de 51,6 grammillimètres; dans le second cas, elle est de 183 grammillimètres; dans le troisième, de 32 grammillimètres; dans le quatrième, de 18 grammillimètres.

² MM. Volkmann, Fick et Heidenhain ont appelé l'attention sur un point qui n'avait pas suffisamment préoccupé M. Weber, c'est-à-dire sur les effets qui surviennent dans les muscles en expérience, sous l'influence de la *fatigue musculaire*, effets qui introduisent naturellement un élément nouveau dans le problème.

D'un autre côté, ils ont aussi cherché à apprécier la valeur de l'élasticité et quel rôle elle joue dans les expériences. Ils n'ont pas employé l'appareil de M. Weber, représenté fig. 104, mais un appareil enregistreur ou kymographe, et la valeur du raccourcissement du muscle se trouve figurée sur le tambour par un crayon fixé au muscle. Voici, pour fixer les idées, l'une des méthodes employées. Le muscle hyoglosse d'une grenouille, fixé à l'une de ses extrémités, est chargé à l'autre bout d'un

§ 238.

Ce qu'on appelle le déchet musculaire.—**Travail utile des muscles.**—Lorsqu'un muscle ou un groupe de muscles associés se contractent pour mettre en mouvement les leviers sur lesquels ils s'insèrent, jamais le *résultat produit* n'est égal à la *force dépensée* par le muscle ou par les muscles en action. La différence qui existe entre le résultat produit et la force réelle dépensée par le muscle, cette différence existe dans toute machine, quelle qu'elle soit. Elle est due aux pertes déterminées par les *résistances passives*. Dans toute machine en mouvement, les résistances que doit surmonter la force motrice sont de deux espèces : les unes sont les *résistances utiles*, celles que la machine a pour objet de vaincre; les autres sont les *résistances passives*. Jamais une machine n'utilise intégralement toute la force motrice; en d'autres termes, jamais une machine ne rend, sous forme de travail utile, tout le travail moteur initial. Plus la quantité de travail utile, comparée à une quantité donnée de la force motrice initiale, est grande, plus la machine est parfaite. Il en est absolument de même dans les phénomènes de l'action musculaire : le résultat produit n'est jamais égal à la force déployée par le muscle. La perte due aux *résistances passives* de la machine humaine est généralement désignée, par les physiologistes, sous le nom de *déchet musculaire*.

Le déchet musculaire, ou, ce qui est la même chose, les *résistances passives*, qui absorbent une partie de la puissance développée par les muscles, sont de diverses sortes. La plus générale, celle qui s'étend à tout le système, consiste dans les frottements des surfaces articulaires et dans ceux des tendons sur les coulisses de glissement. Ces frottements sont, d'ailleurs, comme dans nos machines, atténués autant que possible par l'humeur synoviale, qui lubrifie les surfaces au contact.

Une autre cause de déchet musculaire, très-répondue aussi dans le système musculaire, c'est l'insertion plus ou moins oblique des fibres musculaires sur leur tendon commun. Il n'y a dans l'économie qu'un très-petit nombre de muscles à fibres parallèles aux tendons, et parmi les muscles qui se rapprochent le plus de cette disposition, tels que le biceps brachial, le demi-tendineux, etc., il n'y a même rigoureusement que les fibres qui occupent le centre du muscle qui soient parallèles au tendon. Dans un grand nombre de muscles, l'insertion oblique des fibres sur le tendon est très-prononcée, et c'est alors et surtout que cette résistance passive acquiert toute son énergie. On conçoit, en effet, que dans cette disposition, une certaine partie de la force se trouve anéantie par l'ef-

poids de 10 grammes. Tantôt ce poids de 10 grammes fixé au muscle est soutenu par un appui pendant le repos du muscle, à une hauteur équivalente à la longueur naturelle du muscle, tantôt, au contraire, ce poids pèse sur le muscle pendant le moment du repos, c'est-à-dire qu'il détermine d'une manière permanente un certain allongement élastique. Si l'on exerce une excitation d'égale mesure, sur un muscle placé dans ces deux conditions différentes, on constate que la valeur du raccourcissement est plus considérable sur le muscle distendu par le poids, que sur le muscle qui le soulève sans avoir été préalablement allongé.

fort en sens contraire des fibres opposées. La résultante n'est donc jamais égale à la somme des composantes.

Une autre perte de travail est due au mode d'insertion des muscles sur les leviers qu'ils doivent mouvoir. Cette insertion est généralement désavantageuse. La force, en effet, est appliquée, dans la plupart des points, presque parallèlement aux leviers; aussi, lorsque le muscle se contracte, une grande partie de la force tend à appuyer le levier directement contre son point d'appui dans l'articulation. Il est vrai que les renflements que présentent les extrémités des os, et aussi la présence, sur la continuité des os, d'éminences plus ou moins saillantes, atténuent une partie de ces résistances; mais elles n'en sont pas moins assez considérables. Les résistances dont nous parlons ne sont pas les mêmes à tous les moments du mouvement. Ainsi, par exemple, dans la flexion de l'avant-bras sur le bras, la direction de la force (biceps), par rapport au levier en mouvement (avant-bras), change à chaque moment et se rapproche de plus en plus de l'angle droit. La perte de travail due au mode d'insertion des tendons sur les os diminue donc à mesure que le mouvement de flexion se prononce, et, vers la fin du mouvement, il y a une plus grande quantité de travail moteur d'utilisée¹. Nous pourrions multiplier presque à l'infini les exemples de ce genre.

Les diverses pièces solides (os) autour desquelles sont groupées les puissances actives (muscles) ne sont point inflexibles et inextensibles dans le sens rigoureux du mot, d'où il résulte encore une certaine dérivation de force. Il est vrai que, dans les faibles charges qu'ils supportent ordinairement, cette perte peut être négligée.

Dans les divers mouvements de la machine humaine, il y a donc une certaine quantité de force consommée, et la contraction musculaire, lorsqu'elle entre en jeu, n'est pas seulement proportionnée au *travail utile*, elle a pour mesure le *travail résistant*, expression par laquelle on désigne, en mécanique, la somme de toutes les résistances. C'est pour cette raison que les diverses expériences faites sur la puissance de contraction des muscles *isolés* (Voy. § 237) ne sont pas absolument applicables à l'animal vivant; elles constituent seulement l'un des éléments du problème et non tout le problème. La valeur des résistances passives est d'ailleurs très-difficile à apprécier. Elle l'est dans les machines, et, à plus forte raison, dans l'organisme animal, où les forces composantes (fibres musculaires) se trouvent associées dans des directions presque infinies.

Il peut paraître singulier que dans la machine animale la force ne soit pas ménagée, et qu'une assez grande partie soit dépensée en pure perte. Mais tout étonnement cesse si on réfléchit qu'il y a dans le mouvement quelque chose de plus important que la force elle-même; ce quelque chose, c'est le *mode* du mouvement, sa *vitesse*, qualités subordonnées, ainsi que nous allons le voir, au genre des leviers osseux, et par consé-

¹ Remarquons, d'ailleurs, qu'en même temps aussi la contraction musculaire approche de ses limites et diminue, par conséquent, d'énergie.

quent, à l'agencement des segments dont se composent les membres. La force n'avait pas besoin d'être ménagée, car elle git dans le volume des muscles (§ 237), et, grâce à la situation des muscles par rapport aux leviers, ce volume peut augmenter sans nuire à l'accomplissement du mouvement.

§ 239.

Force mécanique de l'homme. — La force de l'homme peut être employée de bien des manières. L'homme peut, sans se déplacer, pousser ou tirer avec les mains en des sens divers: lorsqu'il agit dans le sens horizontal ou dans le sens vertical, il peut y joindre une partie du poids de son propre corps; l'homme peut également pousser ou tirer, en marchant ou en courant; il peut encore agir seulement par son poids, par exemple, lorsqu'il fait mouvoir les roues à chevilles des carrières.

La grandeur de la force que peut déployer l'homme varie beaucoup, suivant la manière dont elle est appliquée. Le travail de l'homme, ainsi d'ailleurs que la contraction musculaire, est nécessairement intermittent, et il ne peut travailler qu'à la condition de se reposer. Dans le cas contraire, il s'épuise promptement, et le travail ultérieur en souffre d'autant. Lorsque l'homme travaille d'une manière continue, il ne doit exercer à chaque instant qu'une portion de la force maximum dont il est capable. L'expérience a appris que le maximum de travail que peut fournir l'homme consiste dans l'élévation successive de son corps sur les échelons d'une roue à chevilles. La quantité de travail ainsi produite est équivalente à son propre poids multiplié par la hauteur totale à laquelle son corps aurait été élevé suivant la verticale, pendant tout le cours de la journée. On calcule qu'en agissant ainsi, un homme peut, en huit heures de travail effectif, produire dans la journée un travail équivalent à 260,000 kilogrammètres¹. Lorsque la force de l'homme est appliquée de toute autre manière, lorsque, par exemple, il met en mouvement des manivelles diverses à l'aide de ses bras, il est rare que la quantité de travail produite dans le même temps s'élève au-dessus de 175,000 à 200,000 kilogrammètres.

L'homme n'applique pas toujours ses forces à un travail soutenu; il a besoin quelquefois de développer pour un instant une grande quantité de force. Il peut supporter sur ses épaules des charges considérables.

¹ Le kilogramme, ou *unité dynamique*, est le travail correspondant à l'élévation d'un poids pesant 1 kilogramme à 1 mètre de hauteur.

E. Weber admettait que la force absolue des muscles était, en moyenne, de 1 kilogrammètre par chaque centimètre carré de section musculaire. Des recherches plus récentes de MM. Knorz, Henke, Heaton et Koster, on doit conclure que cette évaluation est trop basse. Ces expériences, qui ont porté sur les muscles fléchisseurs de l'avant-bras et sur les muscles postérieurs de la jambe, tendent à montrer que la force absolue des muscles est au moins de 4 kilogrammètres par chaque centimètre carré de section. Au reste, il ne faut pas oublier que cette force est très-variable et dépend en grande partie de l'état du système nerveux.

mais à la condition que l'effort ne sera que d'une courte durée. L'homme produit généralement la force maximum dont il est capable lorsqu'il souève de terre un poids placé entre les jambes, ou bien, ce qui est la même chose, lorsqu'il exerce de bas en haut une traction sur un appareil dynamométrique fixé au sol. On estime qu'un homme adulte bien constitué fait alors un effort équivalent au soulèvement d'un poids de 150 ou 200 kilogrammes. La femme a généralement une puissance moindre,

§ 240.

De l'effort. — Dans le dernier exemple que nous venons de choisir, comme toutes les fois que la contraction musculaire doit surmonter une résistance même beaucoup moindre, l'homme fait *effort*, c'est-à-dire que le jeu des muscles se trouve favorisé par un phénomène particulier de respiration. L'effort se produit d'ailleurs dans des conditions très-diverses, et avec des intensités variées. L'homme fait effort lorsqu'il veut soulever des fardeaux, pousser ou tirer des corps pesants, transporter son corps d'un point à un autre par le saut, par la course. L'homme fait encore effort pour vomir, pour aller à la garde-robe, pour chanter, pour crier, pour tousser; la femme pour accoucher, etc.

Lorsque l'effort va se produire, on commence par faire une inspiration profonde, généralement proportionnée au degré de la résistance à vaincre; puis les muscles expirateurs se contractent à leur tour avec énergie. Mais au moment où ces derniers muscles entrent en action, les lèvres de la glotte se rapprochent par la contraction de leurs muscles constricteurs, et le chemin de l'air se trouve fermé¹. Les muscles expirateurs, tendant à diminuer les divers diamètres de la poitrine, pressent sur les gaz contenus dans le poumon. La cage thoracique, pressée ainsi entre la résistance élastique des gaz contenus dans les poumons et la puissance active des muscles expirateurs, se trouve solidement fixée, et le tronc fournit un point d'appui solide aux muscles qui doivent se contracter pour surmonter la résistance.

La *fixation* de la cage thoracique, sur laquelle s'insèrent le plus grand nombre des muscles du tronc et une partie des muscles des membres supérieurs, est donc ce qu'il y a de plus essentiel dans le phénomène de l'effort. La fermeture *absolue* de l'ouverture glottique ne s'observe que dans les efforts violents. Des efforts moins énergiques, comme ceux du chant ou de la toux, par exemple, s'opèrent manifestement sans que la glotte soit fermée, et on sait très-bien que l'homme ou les animaux auxquels on a pratiqué l'ouverture de la trachée au-dessous des cordes vocales sont encore capables d'efforts. La fixation de la cage thoracique, après une forte inspiration, est, en effet, possible encore dans une cer-

¹ Le rapprochement des lèvres de la glotte s'aperçoit très-bien chez les animaux dont on a découvert la partie supérieure du larynx, et au moment où ils font *effort* pour se dégager des mains de l'expérimentateur.

taine mesure, quand la glotte est ouverte. L'air qui sort des poumons, dans une expiration normale et tranquille, met un certain temps à franchir la voie *étroite* du larynx pour se porter au dehors. Lorsque les muscles expirateurs se contractent *brusquement* et *énergiquement*, la cage thoracique s'applique avec force sur les poumons, et l'air contenu dans ces organes, ne pouvant franchir instantanément le larynx, se trouve comprimé; son ressort élastique augmente momentanément, d'où fixation, momentanée aussi, de la cage thoracique elle-même. Dans ce cas, il est vrai, la fixation est moins solide, et surtout l'effort est moins soutenu que lorsque la glotte est complètement fermée. Le mécanisme de l'effort n'en est pas moins le même. L'animal dont la trachée est ouverte peut, d'ailleurs, suppléer à la durée de l'effort par une succession précipitée de mouvements expiratoires énergiques.

L'effort consiste donc essentiellement dans la contraction énergique des muscles expirateurs et dans l'étranglement des voies que doit parcourir l'air pour se porter au dehors. Au moment de l'effort, l'air comprimé dans les poumons sort avec bruit par la glotte, toutes les fois que celle-ci n'est pas fermée.

Le moucher et le cracher (§ 133) sont aussi accompagnés d'une sorte d'effort. La contraction énergique des muscles expirateurs augmente le ressort élastique de l'air contenu dans les poumons, et cet air s'échappe avec force, entraînant avec lui les mucosités qui doivent être expulsées. Les voies par lesquelles doit passer l'air pour se porter au dehors sont, d'ailleurs, rétrécies alors, non plus par les lèvres de la glotte, mais plus haut, par le rapprochement préalable des lèvres (cracher), ou par le pincement du nez (moucher); ce rétrécissement augmente d'autant la tension élastique de l'air comprimé par les muscles expirateurs, et par conséquent l'intensité du courant de sortie.

L'effort, étant déterminé par la contraction soutenue des muscles expirateurs, est souvent accompagné de la sortie involontaire des matières contenues dans les réservoirs naturels, et il préside aussi, la plupart du temps, à leur expulsion normale (Voy. §§ 35 et 175). Lorsque l'effort est énergique, il peut survenir des accidents graves, tels que la sortie des viscères en dehors de la cavité abdominale (hernies).

Au moment de l'effort, la circulation pulmonaire est remarquablement gênée. L'air renfermé dans les poumons, étant comprimé, oppose en ce moment, obstacle à l'arrivée du sang dans le réseau capillaire. Celui-ci s'accumule dans le cœur droit, puis dans les veines, et, pour peu que l'effort se prolonge, les veines de la tête, du visage, du cou, des membres supérieurs, se distendent. On peut voir survenir alors des accidents hémorrhagiques du côté du cerveau, chez les individus prédisposés à l'apoplexie. L'air comprimé dans les poumons, au moment de l'effort, détermine parfois aussi la rupture des vésicules pulmonaires (emphyseme).