

Bibliothèque numérique

medic@

Marey, Etienne-Jules. - Des forces utiles dans la locomotion [Conférence faite au congrès international d'hygiène de La Haye (septembre 1884).]

*In : Revue scientifique, 1884,
XXXIV, 513 - 524*



(c) Bibliothèque interuniversitaire de médecine (Paris)
Adresse permanente : <http://www.biium.univ-paris5.fr/histmed/medica/cote?marey206>

REVUE SCIENTIFIQUE

(REVUE ROSE)

DIRECTEUR : M. CHARLES RICHET

2^e SEMESTRE 1884 (3^e SÉRIE)

NUMÉRO 17.

(21^e ANNÉE). — 25 OCTOBRE 1884.

PHYSIOLOGIE

M. MAREY

Des forces utiles dans la locomotion (1).

Si l'on demandait à un ingénieur quelles sont les forces utiles dans une machine dont il connaît parfaitement les organes et la fonction, il y répondrait sans doute aisément. Mais cette question, posée à un physiologiste, est plus embarrassante, car le jeu des différents muscles, des leviers osseux et des articulations offre une complication extrême en raison de la grande variété des mouvements que les êtres vivants sont capables d'exécuter. Même en restreignant mon programme à la locomotion humaine et aux actes les plus usités de l'homme, il me semble encore bien étendu, car l'honneur de parler dans un congrès d'hygiénistes m'impose certaines obligations. Vous attendez sans doute de moi quelques applications pratiques, quelques indications sur les avantages hygiéniques de l'exercice musculaire, quelques notions sur la meilleure utilisation de nos forces dans les différents actes que nous avons à accomplir. Toutes ces questions se rattachent à l'hygiène, et particulièrement à celle de l'ouvrier et du soldat. Je ferai mon possible pour que votre attente ne soit pas entièrement déçue.

En physiologie comme en mécanique, c'est l'introduction des mesures précises qui a réalisé les vérita-

bles progrès ; à ce titre, les frères Weber ont bien mérité de la science, mais les moyens dont ils disposaient étaient insuffisants : un chronomètre pour mesurer la durée des actes les plus rapides, une mire pour estimer l'étendue des mouvements, c'étaient là des ressources bien insuffisantes pour aborder l'une des questions les plus compliquées de la mécanique animale. C'est encore avec reconnaissance qu'il faut citer les recherches de Duchenne de Boulogne sur l'action des différents muscles dans la locomotion, recherches basées sur les résultats expérimentaux obtenus par l'électrisation individuelle de chacun de ces muscles.

Aujourd'hui, la physiologie dispose de nombreux appareils et de méthodes délicates pour l'analyse des mouvements les plus compliqués. Et puisqu'on peut mesurer avec une précision parfaite les durées, les forces, les espaces parcourus, rien n'empêche plus de déterminer l'action des forces dans la machine animale et d'en mesurer le travail, ce qui est la seule connaissance véritablement utile à acquérir.

Les forces et le travail ont la même mesure en physiologie qu'en mécanique : un effort capable de soutenir un poids de dix kilogrammes sera mesuré par le poids même auquel il fait équilibre, et si notre action musculaire soulève ce poids à un mètre de hauteur, nous aurons fait un travail égal à dix kilogrammètres.

Il est encore d'autres sortes de résistances qui, en physiologie comme en mécanique ordinaire, interviennent fréquemment ; ce sont les résistances d'*inertie*, celles que les masses à mouvoir opposent aux forces qui tendent à les déplacer. Ces résistances sont

(1) Conférence faite au congrès international d'hygiène de la Haye. (septembre 1884).

liées à la vitesse que la force imprime à chaque instant au corps mis en mouvement; et quand la force a fini d'agir, on a la mesure du travail accompli, si l'on connaît à la fois la masse du corps et la vitesse que cette masse a acquise. La formule $\frac{1}{2} M V^2$ représente le travail dépensé dans cette condition.

On voit, par ce qui précède, que toute mesure du travail humain, toute recherche de sa meilleure utilisation supposent une connaissance exacte des efforts développés et des mouvements effectués dans chacun des actes que l'on considère. Et cela légitimera, j'espère, les expériences, un peu minutieuses peut-être, que je vais avoir l'honneur d'exposer devant vous.

Les actes de la locomotion sont trop rapides pour que l'œil puisse les saisir dans toute leur complication. Aussi ai-je depuis longtemps cherché à les étudier au moyen de la méthode graphique, si précieuse quand il s'agit d'analyser des mouvements.

Le premier résultat que fournit cette méthode a été la détermination chronographique des appuis et levés des membres dans les différentes allures : la marche, la course, le saut, l'acte de monter ou de descendre un escalier. C'était une des mesures les plus simples et les plus faciles à obtenir. On adapte à la chaussure des appareils qui sont mis en communication avec un style traceur inscrivant sur un cylindre qui tourne d'un mouvement uniforme et avec une vitesse connue. Qu'elle se transmette par l'électricité ou par des tubes à air, la pression du pied sur le sol provoque la pression du style sur le cylindre ; de cette façon, la durée de l'appui de chaque pied se mesure par la longueur de la ligne tracée par le style. Les études entreprises par cette méthode ont établi ou confirmé les faits suivants :

1^o Dans la marche, le corps repose toujours sur le sol, par l'un des pieds ou par les deux pieds à la fois, mais n'est jamais suspendu en l'air.

2^o Dans la marche ascendante, quand on monte un escalier, quand on porte un fardeau ou quand l'allure est très lente, on observe un instant de double appui des pieds. C'est-à-dire qu'un pied ne quitte le sol que lorsque l'autre est posé depuis un certain temps.

3^o Plus l'allure est rapide, plus la durée du double appui diminue. A la limite, le corps s'appuie alternativement sur un pied et sur l'autre.

4^o Dans les allures courues ou sautées, le corps est un instant suspendu en l'air entre deux appuis des pieds ; la durée de cette suspension croît en général avec la vitesse de la course, mais certaines restrictions doivent être posées à cet égard.

Ces études sur les rythmes des battues dans la locomotion humaine ont singulièrement facilité la détermination des allures des quadrupèdes et en particulier celles du cheval. Elles ont fait voir que toute allure quadrupède est formée de deux allures bipèdes con-

cordant entre elles ou se succédant à des intervalles plus ou moins longs. J'ai donné à cet égard un tableau qui permet de saisir aisément la classification autrefois très compliquée des allures du cheval (1).

Au point de vue de la mécanique animale, la notation des appuis et levés des pieds ne donne encore qu'un renseignement bien insuffisant : elle fait connaître la durée d'action des forces musculaires qui impriment au corps son mouvement de translation.

Une légère modification de cette méthode me permet d'obtenir, à chaque instant des appuis du pied, la valeur de la pression exercée sur le sol. La chaussure *dynamographique* employée à cet usage porte une épaisse semelle de caoutchouc à l'intérieur de laquelle est creusée une cavité qui communique par un tube de caoutchouc avec l'intérieur d'un tambour à levier inscripteur. Suivant l'intensité de la pression du pied sur le sol, cette cavité, plus ou moins comprimée, diminue de volume, et l'air qui en est expulsé, pénétrant dans le tambour à levier inscripteur, produit une déviation plus ou moins étendue du levier enregistreur. De cette façon, les ordonnées de la courbe tracée expriment, à chaque instant, la valeur de la pression du pied sur le sol. Pour évaluer en poids la valeur des pressions que la courbe représente, il faut, bien entendu, faire une graduation de l'appareil dynamographique, c'est-à-dire charger la semelle de poids connus et mesurer pour chacun d'eux la hauteur de l'élément correspondant de la courbe.

Quand le corps, porté sur un seul pied, reste immobile, la courbe s'élève à un certain niveau qui correspond au poids du corps ; mais si l'on exécute, par la flexion et l'extension des jambes, des mouvements d'élévation et d'abaissement du tronc, la courbe éprouve des variations de hauteurs correspondantes, exprimant que la pression diminue quand le corps, obéissant partiellement à la pesanteur, est animé d'une vitesse descendante, tandis que la pression augmente quand à l'action de la pesanteur sur le tronc s'ajoute l'effort musculaire employé à se soulever. L'expérience montre, ainsi qu'on pouvait le prévoir, que la pression du pied sur le sol est d'autant plus forte que le mouvement imprimé au corps est plus rapide.

Les efforts impulsifs et les efforts résistants se traduisent de la même manière. Ainsi, quand le corps qui s'abaisse depuis un certain temps est arrêté dans son mouvement par la contraction des muscles, la courbe dynamographique accuse un accroissement de pression semblable à celui qui correspondrait à une contraction impulsive des muscles.

Dans la marche ordinaire, le tracé dynamographique présente des inflexions faciles à expliquer d'après les considérations qui précédent. Sa forme est la suivante :

(1) Voir la *Machine animale*, p. 152.

La courbe tracée qui, pendant le levé du pied, suivait la ligne droite o correspondant à une pression nulle, semble s'élever brusquement et par saccades (1) jusqu'au point t au moment du posé du pied; puis elle tombe au niveau p qui correspond à peu près au poids du corps; la courbe remonte ensuite en i , à son niveau le plus élevé, au moment où le pied presse le sol par sa partie antérieure à la fin de l'appui; enfin la courbe retombe à zéro, au moment où le pied quitte le sol. Il y a donc eu, à deux instants, une pression supérieure au poids du corps, ce qui correspond à deux efforts

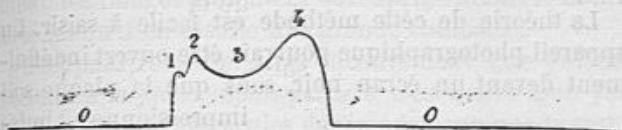


Fig. 16. — Tracé dynamographique : phases de l'appui du pied sur le sol pendant la marche lente.

musculaires. Le premier maximum t répond à l'appui du talon : à ce moment, les muscles résistent pour arrêter la vitesse descendante du corps qui tombe littéralement sur le pied qui se pose. Ce maximum accuse donc l'existence d'un travail résistant. Le second maximum i exprime un travail impulsif; il correspond à l'instant où l'action musculaire intervient pour imprimer au tronc une vitesse ascendante.

Dans ces derniers temps j'ai construit, avec le concours de mon préparateur, M. G. Demeny, un dynamomètre fixe qui présente cet avantage de signaler et d'inscrire deux sortes d'efforts : ceux qui s'exercent perpendiculairement au sol, c'est-à-dire les indications que donne la chaussure dynamographique et ceux qui s'exercent tangentielle au plan du terrain et dont l'existence apparaît clairement quand on marche sur la glace : le pied tend alors à glisser en avant au commencement de l'appui et en arrière à la fin de l'appui. Ces composantes horizontales, presque négligeables dans les allures lentes, prennent au contraire une valeur très grande dans la marche rapide, et surtout dans la course et le saut.

Le dynamomètre fixe est recouvert d'une planchette qui affleure au niveau du terrain sur lequel on marche. On ne peut saisir avec cet instrument que les phases de l'appui d'un pied; mais cette indication suffit dans l'analyse d'une allure régulière, où les appuis de l'un ou de l'autre pied se reproduisent toujours dans des conditions semblables.

Quelle que soit la nature du dynamomètre qu'on emploie dans l'analyse des actes musculaires, l'instrument ne mesure que la valeur des efforts développés par les muscles, c'est-à-dire un des facteurs du travail effectué. L'autre facteur est le chemin parcouru par le

centre de gravité du corps pendant chacune des phases de la pression mesurée.

C'est encore à la méthode graphique que j'ai demandé la solution de ce nouveau problème. Des appareils spéciaux recevaient l'indication des différents mouvements d'oscillations verticales du corps, les balancements du bassin et les appuis et levés des pieds pendant que le marcheur suivait une piste circulaire au centre de laquelle les appareils enregistreurs étaient placés.

Mon élève et ami G. Carlet, actuellement professeur à la Faculté des sciences de Grenoble, a fait au moyen de ces appareils une étude très complète de la marche de l'homme. Ses expériences, déjà vieilles de quinze ans, n'ont pas été surpassées au point de vue de la précision des résultats; cependant elles ne répondent pas encore à toutes les exigences du problème : d'une part, elles ne pouvaient guère s'appliquer qu'à une marche lente, puisqu'on devait suivre une piste circulaire de 3 mètres de rayon; d'autre part, elles ne renseignaient pas sur le détail si important des flexions et extensions alternatives des jambes, ni sur la trajectoire suivie par les différentes articulations des membres inférieurs.

Dans un récent travail le docteur Vierordt (1) a cherché à combler quelques-unes de ces lacunes. Il couvrit d'une longue et large feuille de papier le terrain sur lequel devait s'effectuer la marche ou la course; puis, adaptant au pied du marcheur un crayon dont la pointe frottait constamment sur le papier, il obtint la projection, sur un plan horizontal, de la trajectoire du pied pendant la période du levé. Pour obtenir la projection dans un plan vertical des déplacements éprouvés par différents points du tronc et des membres, le même auteur adapte au point dont il veut connaître les mouvements un petit réservoir d'encre dont le contenu jaillit continuellement contre un mur recouvert de papier et le long duquel marche le sujet en expérience.

Ces dispositions ingénieuses ne sont pas à l'abri de tout reproche au sujet de la fidélité des indications qu'elles fournissent. D'une part, le crayon dont le pied est muni, restant constamment en contact avec le sol par l'effet de l'allongement d'une courbe, on ne peut plus considérer la courbe tracée comme l'expression des mouvements réellement exécutés par le pied; toutefois on peut, dans certaines limites, rectifier ces indications et corriger les causes d'imperfection de la courbe tracée. Un point important ressort de ces premières expériences : c'est que le pied, à la fin de sa période de levé, est un peu projeté en avant et qu'il rétrograde avant de se poser sur le sol.

Les courbes obtenues par l'injection d'encre contre une paroi verticale sont passibles de reproches plus

(1) La saccade du posé du pied tient aux contacts successifs du talon et de la plante du pied avec le sol.

(1) Vierordt, das Gehen des Menschen.

graves ; en effet, l'inertie du liquide projeté l'empêche d'atteindre la paroi au point qui est situé juste en face de l'orifice de jaillissement ; la courbe est donc nécessairement déformée et la déformation, cette fois, ne saurait être rectifiée puisque rien n'en fait connaître la cause, c'est-à-dire la vitesse du point dont la courbe tracée est censée représenter la trajectoire.

Il est aujourd'hui une méthode qui comble tous les désiderata ci-dessus exposés : c'est l'emploi de la photographie instantanée avec certaines modifications qui répondent tout particulièrement à la question qui nous occupe.

Vers l'année 1880, un riche Américain, M. Stanford, frappé du désaccord qui régnait au sujet du mécanisme des allures du cheval, pensa que la photographie pouvait résoudre ces questions, en fixant l'image de l'animal dans chacune des attitudes qu'il présente à différents instants de ses allures. M. Muybridge, de San-Francisco, se chargea de réaliser ces expériences qui lui acquièrent une juste célébrité.

M. Muybridge disposait une série d'appareils photographiques au-devant d'un écran blanc incliné et orienté de façon à réfléchir la lumière solaire dans la direction des appareils. Chacun de ceux-ci était muni d'un obturateur électro-magnétique susceptible de s'ouvrir pendant un temps très court, lorsque le circuit de fils qui le tenait fermé était rompu. Les fils de chaque appareil étaient transversalement tendus au-devant de l'écran sur le chemin que devait parcourir le cheval en expérience.

En rompant successivement chacun de ces fils, le cheval provoquait de lui-même l'ouverture des appareils photographiques dont chacun prenait une image de l'animal dans une attitude particulière. La série de ces attitudes permettait de déterminer les phases successives des mouvements correspondant à chaque allure du cheval.

C'était un travail fort long que de reconstituer ainsi les déplacements de chaque membre du cheval avec la translation du corps qui les accompagne, et malgré le soin que M. Muybridge avait pris de tracer sur l'écran des lignes numérotées servant de points de repère, l'analyse du mouvement était encore difficile.

Après différents essais destinés à recueillir des images successives d'un animal en mouvement dans des con-

ditions plus favorables, j'imaginai une disposition qui me satisfit complètement. C'est ce que je désignerai sous le nom de *photographie sur champ noir*.

On dirige l'appareil photographique sur un écran noir formé de velours tendu sur une muraille, au fond d'un horizon obscur. Devant cet écran on fait passer un cheval blanc ou un homme vêtu de blanc et pendant ce temps, un appareil rotatif laisse passer la lumière d'une manière intermittente. A chaque admission de la lumière une image se forme sur la plaque sensible, et chaque fois sur un point différent de la plaqué.

La théorie de cette méthode est facile à saisir. Un appareil photographique pourrait être ouvert indéfiniment devant un écran noir, sans que la plaque soit impressionnée, puisqu'elle ne reçoit aucune lumière. A un moment donné, faisons apparaître devant un point de cet écran un homme vêtu de blanc et fortement éclairé ; une image se formera sur la plaque. Fermons alors l'appareil et plaçons encore l'homme devant l'écran, mais dans un autre endroit ; une autre image pourra être produite encore

impressionnée, puisqu'elle ne reçoit aucune lumière. A un moment donné, faisons apparaître devant un point de cet écran un homme vêtu de blanc et fortement éclairé ; une image se formera sur la plaque. Fermons alors l'appareil et plaçons encore l'homme devant l'écran, mais dans un autre endroit ; une autre image pourra être produite encore

sans se confondre avec la première, car le déplacement de l'homme aura amené la nouvelle image en un endroit de la plaque sur lequel la lumière n'a pas encore agi. On peut multiplier indéfiniment ces photographies successives. Le rôle de l'interrupteur rotatif est précisément de laisser au marcheur le temps de changer de place entre deux photographies successives, et de faire que ces images soient séparées les unes des autres par un intervalle exactement proportionnel au chemin parcouru par le marcheur entre deux admissions successives de la lumière, soit un dixième de seconde (1).

On obtient ainsi des séries d'images d'hommes ou d'animaux en mouvement représentés dans les attitudes correspondant à des intervalles de temps connus.

Lorsqu'on prend sur la même plaque une série de photographies représentant les attitudes successives d'un animal, on cherche naturellement à multiplier ces images pour connaître le plus grand nombre possible de phases du mouvement. Mais, quand la translation de l'animal n'est pas rapide, la fréquence des

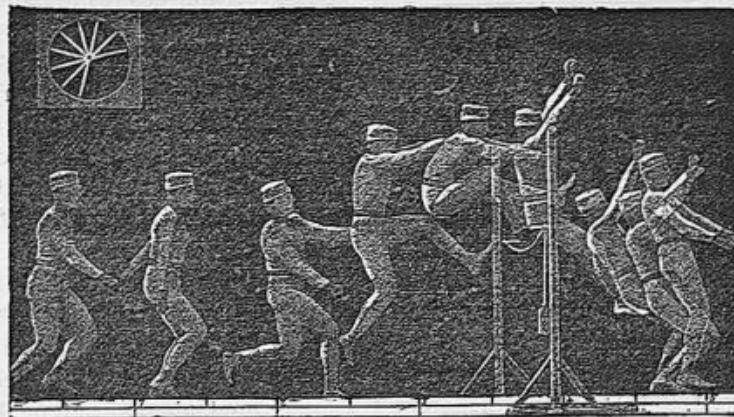


Fig. 17. — Représentant un sauteur photographié dans ses attitudes successives à des intervalles de $1/10^{\text{e}}$ de seconde.

(1) Voir, pour la description des appareils et des usages qu'ils donnent, la *Méthode graphique*. 2^e édition, 1884.

images est bientôt limitée par leur superposition et par la confusion qui en résulte. Ainsi un homme qui court, même avec une vitesse modérée, peut être photographié dix fois par seconde, sans que les images se confondent. Si, parfois, une jambe vient se peindre en un lieu où une autre jambe avait déjà laissé son empreinte, cette superposition n'altère point les images : les blancs deviennent seulement plus intenses aux endroits où la plaque a été deux fois impressionnée, de sorte que les contours des deux membres se distinguent encore aisément. Mais, quand l'homme marche lentement, les images présentent des superpositions si nombreuses qu'il en résulte une grande confusion.

C'est pour remédier à cet inconvénient que j'ai eu recours à la *photographie partielle*, c'est-à-dire que j'ai supprimé certaines parties de l'image pour que le reste fût plus facile à comprendre.

Comme, dans la méthode que j'emploie, les objets blancs et éclairés impressionnent seuls la plaque sensible, il suffit d'habiller de noir les parties du corps qu'on veut retrancher de l'image. Si un homme revêtu d'un costume mi-parti blanc et noir marche sur la piste en tournant du côté de l'appareil photographique la partie blanche de son vêtement, la droite par exemple, on le verra dans les images comme s'il était réduit à la moitié droite de son corps.

Ces images permettent de suivre dans leurs phases successives, d'une part le pivotement du membre inférieur autour du pied pendant le temps de l'appui, et d'autre part, pendant celui du levé, l'oscillation de ce même membre autour de l'articulation coxo-fémorale, en même temps que cette articulation se transporte en avant d'une manière continue.

Les photographies partielles sont utiles aussi dans l'analyse des mouvements rapides, parce qu'elles permettent de multiplier beaucoup le nombre des attitudes représentées. Toutefois, comme l'image d'un membre présente encore une assez grande largeur, on ne peut multiplier beaucoup ces photographies partielles, sous peine de les confondre par superposition. J'ai donc cherché à diminuer la largeur des images, afin de les répéter à des intervalles extrêmement courts. Le moyen consiste à revêtir le marcheur d'un costume entièrement noir, sauf d'étroites bandes de métal brillant qui, appliquées le long de la jambe, de la cuisse et du bras, signalent assez exactement la direction des rayons osseux de ces membres.

Cette disposition permet de découpler aisément le

nombre des images recueillies en un temps donné sur une même plaque : ainsi, au lieu de dix photographies par seconde, on en peut prendre 100. Pour cela, on ne change pas la vitesse de rotation du disque ; mais, au lieu de le percer d'une seule fenêtre, on en fait dix semblables et également réparties sur toute la circonférence (1).

La figure 18 est faite d'après un des clichés projetés à la lanterne magique ; les lignes ponctuées ont été transformées en traits pleins. Cette figure montre les phases successives d'un pas de course. Le membre inférieur gauche y est seul représenté : des lignes pleines correspondent à la cuisse, à la jambe et au pied ; des points, aux articulations du pied, du genou et de la hanche.

Cette figure exprime déjà assez clairement les alternatives de flexion et d'extension de la jambe sur la cuisse, les trajectoires onduleuses du pied, du genou et de la hanche, et pourtant le nombre des images n'excède pas 60 par seconde. Un disque obturateur percé de fenêtres plus nombreuses donnerait avec bien plus de perfection les déplacements angulaires de la jambe

sur la cuisse et les trajectoires des trois articulations.

Plus on donne de finesse aux lignes qui expriment la direction des membres, plus on peut multiplier le nombre des images ; mais, dans le cas présent, il est plus que suffisant d'avoir soixante fois par seconde l'indication des déplacements du marcheur.

On voit que, dans la méthode d'analyse photographique, les deux facteurs du mouvement, le temps et l'espace, ne peuvent pas être tous deux estimés d'une manière parfaite. La connaissance des positions que le corps a occupées dans l'espace suppose qu'on possède des images complètes et distinctes ; or il faut, pour avoir de telles images, laisser un intervalle de temps assez long entre deux photographies successives. Veut-on, au contraire, porter à la perfection la notion du temps, on n'y peut arriver qu'en augmentant beaucoup la fréquence des images, ce qui force à réduire chacune d'elles à certaines lignes. On concilie autant que possible ces deux exigences opposées en choisissant pour les photographies partielles les lignes et les points

(1) Il est souvent avantageux de donner à l'une des fenêtres un diamètre double de celui des autres ; il en résulte une intensité plus grande de l'une des images, et cela facilite l'estimation des temps, en même temps que cela fournit des points de repère pour comparer les mouvements des membres inférieurs à ceux des membres supérieurs.

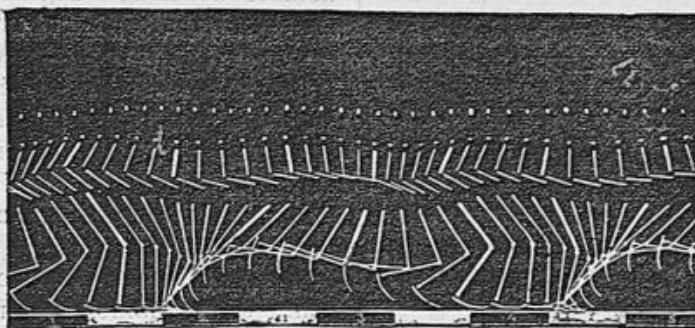


Fig. 18. — Course de l'homme, attitudes successives du membre inférieur gauche.
— Fréquence des images, 60 par seconde environ.

qui renseignent le mieux sur les attitudes successives du corps.

La *chronophotographie* résout le problème de la détermination des espaces parcourus en fonction du temps; elle donne pour chaque instant la vitesse dont la masse du corps est animée, soit dans le sens vertical, soit dans le sens horizontal. Et si l'on combine les indications

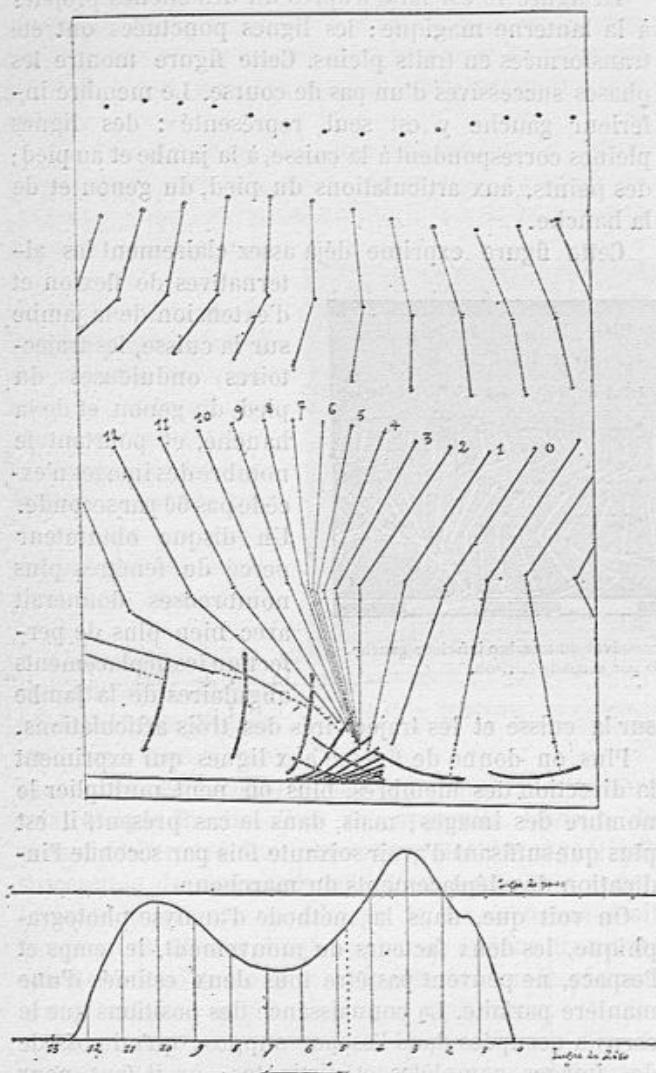


Fig. 19. — En haut, lignes chronophotographiques exprimant douze attitudes différentes du corps pendant l'appui du pied sur le sol. — En bas, courbe dynamographique de la pression du pied sur le sol exprimant la valeur de cette pression à douze instants également distants, dont chacun correspond à une des attitudes déterminées sur la photographie.

de la photographie avec celles du dynamographe, on obtient les éléments nécessaires pour la mesure du travail moteur ou du travail résistant effectué pendant la phase d'appui d'un pied à une allure quelconque. Il faut pour cela placer le dynamographe sur la piste et recueillir les photographies au moment où le coureur passe sur l'instrument.

Soit (fig. 19) la chronophotographie d'un pas de course avec les courbes des pressions normale et tan-

gentielle au terrain pendant la phase d'appui de ce pas. Nous trouverons dans cette double figure les éléments nécessaires pour construire les courbes graphiques des différentes quantités de travail, positif ou négatif, effectuées aux différentes phases de cet appui.

On constate d'abord que sur la figure, la période d'appui du pied contient 12 images, et, comme celles-ci se produisent à des intervalles de $1/50$ de seconde, la phase de l'appui a donc duré $12/50$ de seconde. Sur ce premier point il doit y avoir accord entre les deux figures, la courbe dynamographique exprimant la durée de l'appui du pied. Cette courbe est même plus fidèle, au point de vue des durées d'appui, car elle donne des indications continues, tandis que les indications intermittentes de la photographie comportent une erreur possible dont la valeur décroît à mesure que le nombre des images augmente pour un temps donné. Dans le cas présent, la valeur moyenne de l'erreur probable serait de $1/50$ de seconde; nous la négligerons.

Cela posé, mesurons les déplacements ascendants ou descendants d'un point du tronc du grand trochanter, par exemple (1). Ces mouvements se mesurent entre deux images consécutives; ils correspondent au chemin que le point considéré a parcouru suivant la verticale en $1/50$ de seconde.

Sur des photographies de petite dimension la difficulté de déterminer avec précision le déplacement du point considéré donnerait à ces mesures une grande incertitude; aussi faut-il recourir à l'agrandissement des images, ce qui s'obtient aisément par les procédés ordinaires des photographes.

On conçoit qu'avec ces deux sortes de mesures, celle des efforts successifs et celle des chemins parcourus à chacun de ces efforts, on puisse construire des courbes dont les aires exprimeront le travail positif ou le travail négatif correspondant à un acte quelconque.

Une opération analogue pourra être faite en relevant les accélérations positives dans le sens horizontal et les ralentissements ou accélérations négatives du centre de gravité du tronc aux différentes phases de la période d'appui du pied. Ces déterminations suffisent à elles seules pour mesurer le travail dépensé et les efforts développés entre deux instants consécutifs. Les indications du dynamomètre qui mesure les efforts tangentiels au plan du terrain permettent de contrôler les mesures du travail tirées de la détermination des vitesses; en effet, les efforts sont proportionnels aux accélérations.

On devra donc trouver sur la chronophotographie des accélérations négatives et positives proportionnelles aux ordonnées des efforts tangentiels au sol, ordonnées

(1) On sait que le centre de gravité du corps change dans une certaine proportion pendant les mouvements; il faut donc se contenter d'une mesure approchée des déplacements de ce centre incessamment variable.

considérées aux instants correspondant aux différents intervalles des images.

La chronophotographie donne encore, sur les mouvements de la jambe au levé, de précieuses indications; car elle représente à chaque instant la vitesse et l'attitude du membre, ce qui permet d'estimer les accélérations et les ralentissements du centre de gravité de ce membre.

L'oscillation de la jambe au levé a été considérée par les F. Weber comme un mouvement pendulaire, dans lequel, par conséquent, la pesanteur effectue tout le travail, sans intervention des muscles. J'ai démontré par quelques expériences que ces vues des savants physiciens étaient inexactes et que la forme du mouvement de la jambe n'est point celle d'une oscillation pendulaire. M. Carlet est arrivé au même résultat. Enfin, le raisonnement suffit à prouver que la jambe, en admettant qu'elle puisse exécuter par la pesanteur une oscillation d'une certaine vitesse, ne saurait osciller avec une vitesse plus grande ou plus petite, sans que l'action musculaire intervienne. Or, suivant le rythme de la marche, l'oscillation de la jambe au levé doit s'accomplir en des temps très variables. On peut, en effet, faire en marchant de 40 à 80 pas à la minute. Si l'oscillation pendulaire de la jambe correspondait au chiffre de 50 pas, il est clair que l'action des muscles ne serait pas nécessaire pour cette marche lente; mais, pour les rythmes plus rapides, les muscles devraient agir, et cela avec une énergie d'autant plus grande que le rythme serait plus accéléré.

L'expérience montre, en effet, que les muscles antagonistes se contractent tour à tour et avec énergie pour projeter la jambe ou pour la retenir, et même pour la ramener en arrière à la fin de son oscillation. Voilà deux dépenses de travail dont l'importance est considérable dans les allures rapides. Et notons que le travail dépensé par les fléchisseurs de la cuisse pour lancer la jambe en avant ne sera pas restitué, à moins qu'on ne le considère comme emmagasiné dans les muscles antagonistes ou extenseurs de la cuisse qui sont fortement tendus à la fin de cette oscillation.

En somme, l'oscillation de la jambe au levé, loin d'être un acte automatique, exige au contraire une certaine dépense de travail; ce serait même, d'après M. Demeny, l'acte le plus laborieux dans la marche rapide. Nous verrons tout à l'heure que cette opinion s'appuie sur des résultats expérimentaux fort probants.

En résumé, bien que les méthodes qui viennent d'être décrites soient trop nouvellement employées pour avoir pu donner les résultats qu'on est en droit d'en attendre, j'ai cru pouvoir les signaler et émettre l'espérance qu'elles contiennent la solution des importants problèmes relatifs à la locomotion humaine.

Toutes ces mesures de travail exigeront un grand nombre de documents graphiques et je ne saurais en-

core, d'après les éléments que je possède, hasarder une détermination précise. Il faudra, en effet, comparer les différentes allures et mesurer la dépense de travail correspondant à chacune d'elles, afin de connaître celle qui est le plus favorable dans une circonstance donnée, c'est-à-dire produit un même effet utile avec la moindre dépense de travail. Cette méthode, qui consiste à rechercher le travail dépensé à l'un des appuis d'un pied et à multiplier ensuite la valeur obtenue par le nombre des pas effectués, exige une grande précision dans les mesures, car la moindre erreur commise se multiplie par le nombre des pas effectués pendant un certain parcours.

J'ai essayé d'aborder l'étude des différentes allures par une méthode toute différente qui permet de contrôler les résultats obtenus par la photographie et par la dynamographie.

Il est un principe de physiologie qui se vérifie dans tous les actes musculaires habituels: c'est que chacun de nous trouve par tâtonnement la manière de les exécuter avec la moindre dépense de travail. Cela peut s'appliquer à la locomotion.

Imposez à un marcheur un rythme déterminé et pressez graduellement ce rythme: quand le nombre des pas arrivera à 75 ou 80, instinctivement le marcheur se mettra à courir. Non seulement parce que cette allure lui donnera plus de vitesse, mais aussi parce qu'elle exigera moins de fatigue.

Or M. Demeny observe avec raison que, dans la course à un certain rythme, la durée d'oscillation de la jambe est plus grande que dans un pas de marche de même rythme. En effet, l'essence de la course, c'est de présenter des instants de suspension du corps entre deux appuis successifs, la durée de ces appuis étant elle-même beaucoup plus courte que dans la marche.

Soit figure 19 (ligne supérieure).

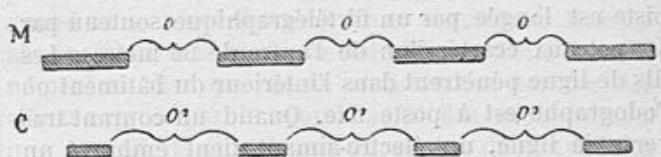


Fig. 20. — M, durée des appuis et des oscillations de la jambe dans la marche; o, correspond aux phases d'oscillation; C, durée des appuis et des oscillations dans une course du même rythme.

La notation des appuis dans la marche pour un rythme de 75 pas à la minute, la durée des oscillations de la jambe sera mesurée par les intervalles o, o, o , qui séparent deux appuis consécutifs. Dans la course (ligne inférieure), la brièveté des appuis laisse une longueur plus grande aux durées d'oscillations o^1, o^1, o^1 .

Ces déterminations de l'influence des rythmes sur la longueur du pas, la vitesse du parcours et la fatigue produite peuvent se faire en mesurant l'espace et le temps dans un long parcours et en divisant ces va-

leurs par le nombre des pas. On obtient ainsi une valeur moyenne à l'abri des petites irrégularités qui pourraient se produire dans un pas de marche.

Pour ce genre d'études, j'ai recouru à un appareil dont j'ai donné la description il y a quelques années, l'*odographe*; mais j'ai fait subir à cet instrument certaines modifications qui le rendent applicable à des mesures absolues d'espaces parcourus en fonction du temps.

L'*odographe* se compose de deux pièces essentielles: d'un cylindre qui tourne avec une vitesse connue, et d'un style qui se déplace parallèlement à la génération de ce cylindre, d'une quantité proportionnelle au chemin parcouru.

Quand l'*odographe* est actionné par la roue d'une voiture, son style avance d'une quantité constante pour chaque tour de roue, c'est-à-dire pour des parcours égaux. Mais si l'on actionne le style par le pas d'un marcheur, le tracé obtenu exprime seulement le nombre de pas effectués en fonction du temps, et si le pas n'a point toujours une même longueur, on obtient des indications inexactes dans l'estimation du chemin parcouru. En effet, l'expérience démontre qu'il suffit d'une légère inclinaison du terrain pour changer la longueur du pas : celui-ci s'allonge dans les montées et se raccourcit dans les descentes.

Pour avoir une inscription fidèle des espaces parcourus, il faudrait que l'*odographe* fût actionné à des fractions égales du chemin, à tous les mètres, à tous les 10 mètres ou à tous les 100 mètres par exemple. J'ai recouru à une disposition qui produit un déplacement d'un millimètre du style de l'*odographe* pour chaque parcours de 50 mètres; voici dans quelles conditions.

La station créée à Paris pour les études de physiologie appliquée renferme une piste circulaire et parfaitement plane de 500 mètres de circonférence. Cette piste est longée par un fil télégraphique soutenu par 10 poteaux écartés l'un de l'autre de 50 mètres. Les fils de ligne pénètrent dans l'intérieur du bâtiment où l'*odographe* est à poste fixe. Quand un courant traverse la ligne, un électro-aimant tient embrayé un rouage moteur qui, s'il était déclenché, ferait avancer le style traceur d'un millimètre suivant la génération du cylindre. Or chacun des poteaux de la ligne télégraphique porte une baguette horizontalement placée en travers de la piste sur laquelle on marche. La moindre poussée détourne cette baguette de sa position et laisse le passage libre au marcheur, après quoi la baguette reprend d'elle-même sa position horizontale. Au moment où elle est déviée par le passage du marcheur, la baguette provoque la rupture du courant de la ligne; il en résulte un débrayement du rouage de l'*odographe* dont le style avance d'un millimètre. Chaque fois que le marcheur a parcouru 50 mètres, il passe devant un nouveau poteau, en dévie

la baguette et provoque une nouvelle progression du style. Mais comme le cylindre tourne uniformément pendant que le style s'avance d'une manière saccadée, il résulte de ces mouvements composés une ligne dentelée dont chaque dentelure correspond à un parcours de 50 mètres. L'évaluation de l'espace parcouru en fonction du temps est facile à obtenir en mesurant les chemins sur l'axe des ordonnées, c'est-à-dire en comptant le nombre de dentelures dont chacune exprime 50 mètres parcourus. Les temps se déduisent de la longueur de l'axe des abscisses sur laquelle la partie considérée de la courbe se projette verticalement. La vitesse du cylindre est réglée de façon que chaque minute corresponde à un demi-centimètre, soit 0^m,30 pour une heure.

D'après cela, si nous trouvons qu'en une heure il s'est produit 80 déplacements du style, nous en conclurons que la vitesse de marche était $50^m \times 80$ ou 4000 mètres à l'heure. On obtient de la sorte une expression parfaitement exacte de la vitesse moyenne pendant les marches de longue haleine. Les accélérations, les arrêts, les ralentissements sont indiqués automatiquement et l'on peut, en réunissant les courbes odographiques de divers marcheurs, les comparer entre elles. D'autres fois, c'est le même marcheur qu'il convient de comparer à lui-même en le plaçant dans des conditions diverses de charge à porter, de vêtement, de chaussures, d'alimentation, de fatigue, de température, etc.

L'*odographe* combiné avec un autre dispositif se prête à mesurer la longueur du pas sous différentes influences.

Un pendule à longueur variable, pouvant battre de 40 à 140 fois par minute, sert à régler le rythme de la marche. Ce pendule interrompt et ferme tour à tour le courant d'un timbre électrique placé au centre de la piste, de manière à être continuellement entendu par le marcheur. On peut donc commander à volonté un rythme de marche plus ou moins rapide et mesurer le temps que le marcheur met à parcourir 1000 mètres avec des rythmes lents ou accélérés.

De cette comparaison ressort un premier fait: c'est que si l'on part du rythme 40 pas à la minute pour aller, en augmentant la fréquence des pas de 5 en 5 par minute, dans une série d'expériences successives, on constate que le kilomètre est parcouru en des temps de plus en plus courts, tant que l'accélération n'atteint pas 75 par minute; au delà de cette fréquence des pas, plus le rythme s'accélère, plus il faut de temps pour parcourir un kilomètre. En même temps le marcheur accuse une fatigue excessive et a grand'peine à s'empêcher de prendre le pas de course, qui, pour un rythme accéléré, est, comme on l'a dit plus haut, beaucoup plus rapide et beaucoup moins fatigant que la marche.

Dans chacune des expériences précitées, il est aisé, d'après le tracé de l'odographe, de déterminer la longueur du pas moyen, puisque l'on connaît le rythme de l'allure. En effet, supposons que la marche soit faite au rythme de 65 doubles pas à la minute et que 1000 mètres aient été parcourus en 9 minutes 22 secondes. Le nombre des pas sera $(9 + \frac{22}{60}) \times 65 = \frac{36530}{60} = 609$ pas doubles. Or si 1000 mètres correspondent à 609 doubles pas, chaque double pas sera de 1^m,67, et le demi-pas ou intervalle de deux appuis successifs sera de 0^m,83 en chiffres ronds.

En opérant ainsi sur de longs parcours (trois tours de piste, c'est-à-dire 1542 mètres) et en déterminant la longueur du pas moyen, on constate que, jusqu'à une certaine fréquence du rythme, la loi des frères Weber se vérifie, c'est-à-dire que le pas s'allonge quand le rythme s'accélère.

Nombre de secondes employées à parcourir 1542 mètres.	Rythme ou nombre de doubles pas à la minute.	Nombre des pas dans 1542 mètres.	Longueur du pas double.
20' 30" = 1230"	60	1135	1 ^m ,33
18' 40" = 1120"	65	1120	1 ^m ,37
16' 27" = 987"	70	1062	1 ^m ,45
14' 38" = 878"	75	1013	1 ^m ,52
13' 52" = 832"	80	1024	1 ^m ,50
13' 3" = 783"	85	962	1 ^m ,46
14' 1" = 841"	90	1164	1 ^m ,32

Mais à un certain degré d'accélération du rythme, le pas se raccourcit. Ainsi, à partir de 75 à la minute, le pas devenant de plus en plus court, sa brièveté fait plus que compenser son accroissement de fréquence et, en définitive, la vitesse diminue.

La même méthode et les mêmes appareils permettent d'apprécier quelles sont les conditions qui favorisent ou qui gênent la marche. En commandant un rythme constant au marcheur, tandis qu'on charge celui-ci de poids graduellement croissants, on voit le pas se raccourcir et l'on détermine à quelle limite de charge on doit s'arrêter pour ne point excéder les forces d'un soldat.

En donnant au marcheur des chaussures différentes dont le talon, très bas dans les premières, soit, dans les autres, de hauteurs graduellement croissantes, on voit que le pas se raccourcit à mesure que le talon est plus élevé et l'on en déduit que la chaussure du marcheur doit avoir le talon aussi bas que possible.

La longueur de la semelle n'est pas non plus indifférente. En effet, le pied touche le sol par le talon et le quitte par la pointe; il y a donc un déroulement du pied sur le sol et la longueur de cet espace couvert par le pied s'ajoute à l'enjambée proprement dite. Cet effet, connu depuis longtemps, doit être étudié soigneusement pour fixer la longueur limite que doit

avoir une chaussure, afin de donner le plus de vitesse à la marche sans augmenter la fatigue.

Enfin, lorsqu'on soumet un homme à des exercices graduellement croissants, l'odographe est d'un précieux secours, car il montre que l'allure propre au marcheur gagne en vitesse, en même temps que le ralentissement qu'amène la fatigue se produit de plus en plus tard. C'est l'effet qu'on désigne sous le nom d'entraînement.

L'état nouveau dans lequel se trouve un homme accoutumé aux exercices musculaires ne porte pas seulement sur ses muscles locomoteurs. On assiste à une transformation graduelle de ses fonctions organiques et, en particulier, de la respiration et de la circulation.

Le coureur inexpérimenté s'essouffle facilement; mais, après quelque temps d'exercice, sa respiration ne s'accélère plus par la course, elle devient seulement plus profonde. C'est donc par une augmentation de sa capacité thoracique que le coureur exercé satisfait au besoin d'une hématoïse plus active. Cette capacité thoracique peut excéder le double de celle qui existait avant l'entraînement. Chose remarquable, le sujet qui a acquis cette respiration large et rare conserve ce type respiratoire, même au repos; il a donc en tout temps une ventilation pulmonaire supérieure à celle des autres hommes.

Enfin la circulation elle-même s'harmonise avec cette modification des mouvements respiratoires : les palpitations qui accompagnent l'essoufflement disparaissent peu à peu et la circulation après la course, bien que plus rapide qu'au repos, ne présente plus l'énorme accélération des mouvements du cœur qu'entraînent, au début, tous les exercices violents.

Les déterminations que je viens d'indiquer et qu'on peut faire au moyen de l'odographe sont précieuses pour mesurer l'*effet utile* qu'on obtient dans la marche quand on se place dans certaines conditions. Mais ce n'est point la mesure du travail effectué. Cette mesure ne peut résulter que de la connaissance parfaite des efforts exercés par le marcheur et des déplacements que ces efforts impriment au centre de gravité du corps.

Dans un acte périodiquement régulier comme la marche, chacun des pas reproduisant les mêmes efforts et les mêmes déplacements, il semble que la mesure du travail soit facile. On a même dit que cette mesure résulte de la simple connaissance du poids du corps et de la hauteur des oscillations verticales que le marcheur exécute à chaque pas. Or, si nous envisageons cette hypothèse, nous trouverons quelque embarras à mesurer le travail effectué.

En effet, dans une oscillation verticale, si le corps pèse 75 kilogrammes et s'élève à 3 centimètres, il sera dépensé pour cette élévation un travail égal à 2^{km},25. Ce travail, se renouvelant deux fois à chaque double

pas, constituera une dépense totale de 225 kilogrammètres au bout de cent doubles pas.

Mais, d'autre part, dans sa phase descendante, chaque des oscillations de la marche donne naissance à un travail négatif de valeur égale au travail positif que représente la phase d'élévation. Si donc on considérait avec certains auteurs que, pour arrêter le mouvement descendant du centre de gravité, les muscles font un travail résistant égal au travail impulsif qui en avait produit l'élévation, il faudrait doubler la valeur du travail effectué et admettre que pour 100 doubles pas il a été produit, tant en travail positif qu'en travail négatif, 450 kilogrammètres. Cette manière d'évaluer le travail semble justifiée par ce fait, que les actes intra-musculaires sont les mêmes, soit qu'il faille soulever un fardeau, soit qu'il s'agisse d'en arrêter la chute, et par cet autre fait, que la fatigue se produit indifféremment, qu'on fasse un travail impulsif ou un travail résistant.

Mais certaines expériences semblent démontrer que cette double dépense de travail n'existe pas réellement et que dans les oscillations alternatives exécutées par notre corps pendant la marche ou la course, une partie du travail dépensé par nos muscles dans la phase d'ascension est emmagasinée dans ces mêmes muscles pendant la phase de descente et sera restituée dans la phase d'ascension prochaine.

Les choses se passent comme dans le rebondissement d'un corps élastique sur un plan horizontal. Le corps tombant d'un lieu élevé rebondit à une hauteur moindre que celle du point de départ; mais si l'on imagine qu'à la fin de chaque rebondissement il intervienne un léger effort impulsif pour achever d'élèver le corps à sa hauteur primitive, on conçoit qu'une série indéfinie d'oscillations puisse être entretenue par la seule dépense de travail nécessaire pour compenser ce que l'élasticité n'a pas restitué. Le travail dépensé à chaque pas se réduirait à un léger appoint si les muscles restituaien pour l'élévation du corps la presque totalité du travail qu'ils ont reçu dans chaque phase d'abaissement. L'expérience suivante montre que cette restitution du travail existe réellement, mais qu'elle ne se produit pas toujours au même degré.

Effectuons un saut sur place avec toute la force dont nos muscles sont capables; nous élèverons le centre de gravité de notre corps à 0^m,60 par exemple. Quand nous retomberons sur nos pieds, nos muscles se flétriront pour amortir la chute, comme on dit, c'est-à-dire qu'ils résisteront en s'allongeant sous l'influence du travail qui leur est communiqué. Nous nous trouverons alors dans une position accroupie quand notre corps aura achevé son abaissement. Effectuons un nouveau saut comme tout à l'heure avec toute la force dont nos muscles sont capables, notre centre de gravité s'élèvera cette fois plus haut que dans le premier saut; il y aura donc eu restitution au profit du second

saut d'une partie du travail dépensé dans le premier.

On a l'habitude de dire qu'un muscle allongé est capable d'effectuer plus de travail que s'il entre en action à partir de sa longueur moyenne. Cela est vrai, pour des raisons qu'il est presque inutile de développer; mais il y a quelque chose de particulier dans l'expérience précitée. En effet, si nous nous plaçons dans une position accroupie identique à celle dont nous sommes partis tout à l'heure pour le saut, nous ferons en vain le plus grand effort musculaire, nous n'arriverons pas à nous éléver à la même hauteur que dans le saut. En outre, si, après un premier saut, nous restons dans la situation accroupie pendant quelques instants, nous perdons l'aptitude à sauter à une grande hauteur; le travail emmagasiné a donc disparu en partie ou en totalité. Cette disparition du travail disponible doit faire admettre comme extrêmement probable que ce travail était emmagasiné dans le muscle sous forme de chaleur. Supposons, en effet, que les éléments actifs du muscle aient été portés par leur allongement à une température supérieure à celle du sang, c'est-à-dire du milieu qui les environne, la circulation dans le muscle sera une cause nécessaire de refroidissement de l'organe et cette chaleur manquera au moment où elle devrait se convertir en travail pour seconder l'action volontaire du muscle dans le second saut.

L'hypothèse de l'emmagasinement du travail sous forme de chaleur dans les muscles n'est, en définitive, que l'extension à ces tissus vivants d'une propriété générale des corps élastiques. Un gaz comprimé s'échauffe et ne restituera par sa détente la quantité de travail qu'il a emmagasinée, que si on ne lui laisse pas le temps de perdre la chaleur libre dégagée par la compression.

Certains corps possèdent à un degré extrême cette propriété de transformer la chaleur en travail, et réciproquement. Le caoutchouc non vulcanisé donne un exemple remarquable de cette transformation.

Prenons un fil de cette substance et soumettons-le à une traction qui le rende cinq ou six fois plus long; ce fil s'échauffe, comme on sait, au moment de l'allongement et se refroidit en revenant à sa longueur primitive. Or, cette chaleur libre que nous constatons à la surface du caoutchouc allongé, c'est du travail emmagasiné sous une autre forme; elle est indispensable pour que le caoutchouc revienne sur lui-même et travaille de nouveau.

En effet, laissons au caoutchouc allongé le temps de se refroidir, ou mieux, afin d'aller plus vite, trempons dans l'eau froide ce fil tendu, afin de lui enlever sa chaleur libre; le fil sera pour ainsi dire figé en allongement et restera indéfiniment sous cette forme nouvelle si nous le maintenons dans un milieu à basse température. A un moment donné, rendons au caoutchouc la chaleur nécessaire, et nous verrons celle-ci se trans-

former en travail; le fil de caoutchouc se raccourcira en soulevant un certain poids.

En expérimentant sur les muscles de la grenouille, on peut constater qu'il se produit des effets analogues et qu'il s'y fait tour à tour des transformations de chaleur en travail et de travail en chaleur.

Plaçons une grenouille sur le myographe et après avoir détruit les centres nerveux ou coupé le nerf sciatique afin de supprimer les mouvements volontaires, exerçons une traction sur le levier au moyen d'un fil. Un obstacle disposé sur le myographe est destiné à arrêter le levier à un point toujours le même et à uniformiser ainsi l'extension du muscle dans les expériences successives.

Exerçons une première traction sur le muscle et relâchons le fil aussitôt; le tracé du myographe montrera que le muscle est revenu complètement à sa longueur primitive. Répétons l'expérience en maintenant la traction pendant une dizaine de secondes; quand le muscle sera relâché, il ne reprendra plus tout à fait sa longueur. Si la durée de traction est plus prolongée, le muscle reviendra moins encore à sa longueur primitive.

La supposition la plus vraisemblable est que, pendant l'allongement du muscle, le travail négatif effectué par cet organe a donné naissance à de la chaleur. Cette chaleur est indispensable à produire le retour du muscle à sa longueur première. Or, plus longtemps dure l'extension du muscle, plus cette chaleur se perd et plus le raccorciissement du muscle est incomplet quand la traction cesse.

Cette supposition devient une certitude quand on voit le muscle, longtemps allongé, revenir peu à peu à sa longueur primitive si on le réchauffe graduellement; y revenir d'une manière soudaine si on lui fournit brusquement de la chaleur.

On pourrait multiplier les preuves à l'appui de cette théorie de la transformation de chaleur en travail dans le muscle, et montrer que la forme même de la secousse musculaire prouve que le muscle est le siège d'une production intermittente et d'une déperdition continue de chaleur.

Assurément, il faudra beaucoup méditer sur ces faits et instituer bien des expériences avant d'avoir tous les éléments d'une théorie thermo-dynamique de l'action musculaire; mais, dès maintenant, certains points semblent établis.

1^o Un acte musculaire commandé par la volonté produira du travail extérieur ou de la chaleur dans le muscle, suivant que l'effort développé sera ou non capable de surmonter la résistance.

La production de chaleur semble amener la fatigue, comme le ferait la production d'une certaine quantité de travail; elle constitue donc une consommation inutile d'activité musculaire, puisque le but qu'on se propose est d'effectuer un travail extérieur.

Comme conséquence, tout acte musculaire doit être réglé de manière à surmonter les résistances à vaincre, condition indispensable à son utilisation.

2^o Pendant toute la durée d'un acte musculaire, c'est-à-dire tant que le travail extérieur n'est pas effectué, il existe dans le muscle une certaine quantité de chaleur libre, chaleur que la circulation enlève et répand dans tout l'organisme d'où elle s'échappe peu à peu. Cette chaleur, si elle fut restée dans le muscle, eût été transformée en travail; elle disparaîtra en quantité d'autant plus grande, que la circulation aura plus longtemps agi pour l'enlever. Par conséquent, un acte musculaire sera d'autant plus complètement utilisé sous forme de travail, que sa durée sera plus courte.

Soit un poids de 20 kilogrammes à éléver à 1 mètre de hauteur; on effectuera avec moins de dépense d'activité musculaire les 20 kilogrammètres que représente ce travail en l'accomplissant un peu rapidement qu'en agissant d'une manière très lente. Ce principe trouverait de nombreuses applications dans la détermination du rythme des différents actes musculaires : chacun a éprouvé combien il est fatigant de marcher plus lentement qu'à son allure accoutumée. Mais, d'autre part, exécuter des mouvements trop rapides entraîne une dépense exagérée de travail pour d'autres raisons.

3^o Il est certaines résistances qui croissent plus vite que la vitesse imprimée aux corps déplacés : par exemple, celles qu'on éprouve à faire mouvoir ces corps dans l'air ou dans l'eau. Ainsi une hélice qu'on fait tourner dans l'air, un bateau qu'on hale sur un canal, présentent une certaine résistance pour une certaine vitesse; mais la résistance croîtra comme les nombres 4, 9, 16, etc., si la vitesse est double, triple ou quadruple. On conçoit que l'action intermittente des muscles soit défavorable à ce genre de travail, car si la force motrice, par exemple, n'agit que moitié du temps, il faudra, pour effectuer le même déplacement des mobiles sur lesquels elle agit, qu'elle leur imprime pendant sa phase d'action une vitesse double, afin de compenser le temps d'arrêt. Or cette vitesse double entraîne une dépense de travail quatre fois plus grande. J'ai montré ailleurs (1) comment, au moyen de certains artifices, la nature économise, en pareil cas, le travail intermittent des muscles en l'emmagasinant dans un tissu élastique, afin que ce travail soit restitué d'une manière sensiblement continue, c'est-à-dire en imprimant au corps à mouvoir une vitesse moyenne entre les brusques déplacements et les arrêts complets. C'est ce qui arrive dans la circulation, où le cœur est secondé dans son travail intermittent par l'élasticité des artères qui uniformise le cours du sang. Des artifices analogues peuvent avantageusement être employés pour la meilleure utilisation des forces musculaires de l'homme ou des animaux. J'ai obtenu une économie du travail

(1) *La Machine animale.*

moteur pouvant aller à 23 pour 100 en substituant aux traits rigides qui relient le cheval à la voiture des traits extensibles jusqu'à un certain degré. Cet intermédiaire élastique amortit les chocs qui sont, comme on l'a prouvé, une cause de perte de travail; il emmagasine une partie de l'effort musculaire, de façon à en accroître la durée et à transformer en un mouvement plus lent, mais continu, une série de déplacements plus ou moins saccadés et intermittents, comme la force musculaire qui les engendre.

Cet effet est encore bien plus prononcé quand il s'agit de la traction d'un bateau. La pratique a conduit les mariniers à se servir pour cet usage de cordes très longues et très pesantes. Les chevaux marchent parfois à 100 mètres en avant du bateau, et la traction en est d'autant plus facile. Cette disposition n'a pas seulement pour but de rendre moins oblique l'effort de traction et de le diriger sensiblement suivant l'axe du chemin à parcourir, elle produit une économie de travail moteur en diminuant la résistance à vaincre. On peut se convaincre du reste que rien n'est pénible comme de traîner un bateau avec une corde très courte, surtout si on le remorque en conduisant soi-même un autre bateau par l'action intermittente des avirons. Mais si la corde est longue, le bateau à remorquer offre incomparablement moins de résistance. Voici ce qui se produit. Chaque effort musculaire a pour premier effet de tendre la corde qui, dans l'intervalle de deux efforts successifs, s'incurve par son propre poids. Mais en cédant à l'action de la pesanteur, la corde exerce une traction sur le bateau remorqué; elle continue ainsi l'effort moteur dont elle avait emmagasiné une partie pour se tendre. De cette façon, la vitesse uniformisée du bateau est une moyenne entre des progressions rapides suivies de temps d'arrêt. Or pour un parcours régulier de 1 mètre à la seconde, il faut une somme de travail deux fois moindre que pour imprimer à ce bateau une vitesse double pendant une demi-seconde suivie d'un temps d'arrêt absolu.

Des organes élastiques placés sur le trajet des traits agissent de la même façon, mais ils sont seuls applicables dans la traction des voitures.

Ces exemples montrent que les études théoriques de la locomotion conduisent à des applications pratiques importantes, à une économie du travail moteur. Cette économie, dans des machines industrielles, est déjà la préoccupation dominante des ingénieurs; mais elle est plus intéressante encore lorsqu'il s'agit d'épargner à l'homme la fatigue physique, l'une des causes les plus habituelles de maladies. A ce titre, les efforts des physiologistes concourent avec ceux des hygiénistes. Nous poursuivons tous le même but, l'amélioration du sort de l'humanité.

MAREY,
de l'Institut.

PHYSIQUE DU GLOBE

Les trombes, la grêle, l'électricité atmosphérique (1).

I. — J'avais tâché d'établir que les trombes se formaient en général par le croisement de deux courants aériens superposés, venant à se tangenter sur une certaine étendue.

« Je comprends difficilement, m'écrivait-on, comment un tourbillon pourrait se former dans un grand courant, autrement qu'à l'aide des inégalités de vitesse qui y existent d'avance, en vertu de causes quelconques persistantes. »

Il est certain que deux vents situés à des hauteurs très différentes peuvent circuler sans se gêner, car c'est la loi générale des mouvements de l'atmosphère; mais ces vents seront séparés par une bande de calme.

Cette bande sera plus ou moins épaisse, et l'on peut comprendre des *à-coups* dans l'atmosphère, qui ne se meut pas assez vite pour rétablir immédiatement l'équilibre rompu. Il en résultera que la zone de calme pourra disparaître en partie et qu'il y aura collision entre les deux vents précités.

« Qu'il s'agisse d'une trombe ou d'un cyclone, les causes en sont toujours les mêmes. »

Faisant sans doute allusion à cette phrase, un éminent météorologue m'écrit qu'il admettrait difficilement que la formation des cyclones soit due au froissement de deux couches aériennes.

Le S.-O., dans les couches élevées, a une direction voisine de l'E.-S.-E. près de l'équateur, et je serai disposé à admettre que c'est la combinaison de ces deux courants aériens venant à se frôler qui engendre ces météores. — Cependant il est possible que la courbe fortement recourbée que suit le vent de S.-O. de l'équateur au pôle puisse engendrer des cyclones : cela est conforme aux lois mathématiques du mouvement des fluides ; mais il me semble que cette théorie n'explique pas pourquoi ces météores ne se produisent qu'à des

(1) J'ai publié l'année dernière dans cette Revue un article traitant de la grêle et des trombes.

Depuis lors j'ai reçu, à ce sujet, des lettres de quelques lecteurs et savants météorologues. Dans presque toutes, on me demande des explications sur les mêmes points. De plus, certaines objections m'ont prouvé que je n'avais pas été assez clair dans l'exposé de ces théories.

Je vais discuter brièvement aujourd'hui ces phénomènes, car j'ai remarqué que, dans quelques livres classiques, nouvellement parus, les auteurs n'avaient pas toujours tenu compte des progrès accomplis dans ces dernières années, et notamment des belles théories de M. Faye, publiées dans l'*Annuaire du Bureau des longitudes*.

— Je procèderai suivant l'ordre que j'avais adopté dans mon article de 1883.