

*Bibliothèque numérique*

**medic@**

**Marey, Etienne-Jules. - Des lois de la  
mécanique en biologie**

*In : Revue scientifique, 1886,  
XXXVIII, n° 1, p. 1-9*



(c) Bibliothèque interuniversitaire de médecine (Paris)  
Adresse permanente : <http://www.bium.univ-paris5.fr/hist/med/medica/cote?marey055>

# REVUE SCIENTIFIQUE

(REVUE ROSE)

DIRECTEUR : M. CHARLES RICHTER

2<sup>e</sup> SEMESTRE 1886 (3<sup>e</sup> SÉRIE).

NUMERO 1.

(23<sup>e</sup> ANNÉE) 3 JUILLET 1886.

## BIOLOGIE

COLLÈGE DE FRANCE — HISTOIRE NATURELLE DES CORPS ORGANISÉS  
LEÇON D'OUVERTURE

M. MAREY

### Des lois de la mécanique en biologie.

Messieurs,

Dans les cours des années dernières, nous avons passé en revue différentes fonctions physiologiques : la circulation, la respiration, les actions nerveuses et musculaires, la propriété électrique de certains poissons, enfin la locomotion animale avec ses formes si variées. Dans ces études vous m'avez vu insister particulièrement sur les phénomènes physiques et mécaniques; la cause de cette prédilection mérite d'être expliquée.

De tous les phénomènes que présentent les êtres vivants, les plus intelligibles sont ceux qui se rattachent aux lois générales de la nature, ceux dont l'étude comporte des mesures précises, ceux enfin que nous pouvons reproduire, même en dehors de l'être vivant, au moyen d'appareils de démonstration ou schémas qui les imitent avec plus ou moins de perfection.

Assigner aux phénomènes physiques et mécaniques la part qui leur revient dans les fonctions de la vie, c'est supprimer beaucoup d'hypothèses imaginées autrefois sur les forces vitales et sur les propriétés des tissus vivants. Qu'est devenue la *force pulsifique* des artères,

3<sup>e</sup> SÉRIE. — REVUE SCIENTIFIQUE. — XXXVIII.

maintenant qu'on sait reproduire, sur des tubes élastiques où circule de l'eau, toutes les formes que présente le pouls artériel soit à l'état de santé, soit dans les maladies?

Certaines propriétés physiques des tissus vivants tiennent dans leur dépendance un grand nombre de phénomènes divers. Ainsi, l'élasticité des vaisseaux artériels produit les ondes du pouls; c'est elle qui transforme l'arrivée intermittente du sang dans l'aorte en un écoulement continu dans les vaisseaux capillaires; c'est elle enfin qui épargne la force du cœur en diminuant la résistance que cet organe éprouve chaque fois qu'il envoie dans l'aorte ou dans l'artère pulmonaire une nouvelle ondée de sang. Dans le système musculaire, l'élasticité joue un rôle analogue et non moins important. Dans la respiration, son action alterne avec celle des muscles pour mettre en mouvement l'air qui entre dans le poumon et en sort tour à tour.

Une autre propriété physique des tissus vivants et des liquides de l'organisme, leur *incompressibilité* presque absolue, a de nombreuses et importantes conséquences. C'est parce que les animaux marins sont incompressibles qu'ils peuvent vivre à des profondeurs énormes et sous des pressions formidables, tandis que les mammifères ou les oiseaux ne sauraient être immergés à 30 ou 40 mètres de profondeur sans subir, de ce fait, des lésions importantes dues à la compression des gaz que renferment leurs cavités splanchniques.

En raison de son incompressibilité et de l'invariabilité de son volume, la fibre musculaire ne peut se raccourcir sans augmenter dans le sens transversal. Les changements de longueur des muscles sont si néces-

1 s.

sairement liés aux variations inverses de leur diamètre transversal que nous avons pu, sur des animaux non mutilés et sur l'homme lui-même, apprécier et inscrire les différentes phases de la contraction d'après les phases du gonflement transversal des muscles.

Enfin, le sang étant incompressible, ainsi que les tissus dans lesquels il circule, tout changement survenu dans la quantité de sang contenue dans un organe y produira nécessairement un changement de volume; nos connaissances les plus précises sur la circulation périphérique ont été fournies par l'inscription des changements de volume des organes.

Les lois de la physique et de la mécanique règlent tous les phénomènes de la locomotion animale et leur donnent une explication rationnelle.

Si l'on suivait dans le passé l'évolution de la biologie, on verrait que toutes les grandes découvertes en physique ou en mécanique ont éclairé d'une vive lumière la nature des fonctions des êtres vivants. Ainsi lorsqu'en 1679, Borelli publia son célèbre traité *De motu animalium*, l'intérêt dominant de cet ouvrage fut qu'on y trouvait appliquées pour la première fois aux phénomènes de la vie les découvertes de Newton, de Galilée, de Toricelli et de Pascal.

De récents progrès de la physique et de la mécanique ouvrent à la biologie un nouveau champ d'applications. La conception si belle de la conservation de l'énergie, de son unité sous des formes diverses, de ses transformations dans lesquelles les affinités chimiques, la chaleur, la force mécanique et l'électricité se substituent les unes aux autres par voie d'équivalence, cette conception, dis-je, est appelée à modifier beaucoup la manière dont nous concevons l'harmonie des fonctions de la vie.

Un souci mal entendu de la dignité de leur science semble avoir longtemps éloigné les naturalistes de tout ce qui paraissait les réduire au rôle de simples applicateurs de lois découvertes par d'autres. Ils ont àprement revendiqué pour les sciences naturelles une autonomie peu enviable, car elle n'eût fait qu'en arrêter les progrès.

Tous les chercheurs s'entraident; les découvertes de chacun profitent à tous; bien plus, tous ceux qui interrogent la nature par l'expérimentation procèdent, en somme, de la même manière.

Pour découvrir un fait nouveau, ne faut-il pas créer des conditions nouvelles qui rendent apparent ce qui échappait à nos sens? Ainsi, lorsque Galilée, pour saisir les lois de la chute des corps, en ralentit la vitesse au moyen du *plan incliné*, de manière à rendre facilement appréciables les positions du mobile à des instants successifs, il usa d'un artifice pour rendre perceptible à l'œil ce qui lui échappait dans les conditions naturelles.

Dans le mécanisme de la locomotion, ce procédé est inapplicable, puisqu'il s'agit d'analyser les mou-

vements tels qu'ils sont sans en altérer la vitesse. L'artifice consiste alors à substituer à l'œil un appareil plus sensible. Or vous avez vu comment, par une série d'images photographiques prises en des temps très courts et à des intervalles égaux, on obtient l'expression des attitudes et des positions successives de l'animal, c'est-à-dire la connaissance complète de ses mouvements.

D'autre part, une même méthode expérimentale s'applique à l'analyse de phénomènes très variés. Si l'on étudie, par exemple, les manifestations les plus spéciales aux êtres vivants, les phénomènes nerveux et intellectuels, dès qu'on veut les soumettre à une analyse rigoureuse, c'est aux méthodes des physiciens qu'il faut recourir. Pour mesurer la vitesse de l'agent inconnu qui parcourt les nerfs sensitifs ou moteurs, le physiologiste emploie la même méthode que le physicien qui veut déterminer la vitesse de l'électricité dans les conducteurs métalliques. La durée des actes cérébraux, celle de l'erreur personnelle des astronomes ont été obtenues de la même manière.

Mais, dira-t-on, la physiologie s'est fondée avec des méthodes spéciales et sans le secours d'instruments précis. Harvey n'eut besoin que d'un scalpel pour démontrer la circulation du sang; la vivisection suffit à Magendie et à Ch. Bell pour faire voir que si l'on coupe certains nerfs on enlève la sensibilité aux régions où ces nerfs se distribuent, qu'en en coupant d'autres, c'est le mouvement qu'on paralyse.

Il est incontestable que les premières notions physiologiques ont été acquises par la contemplation des organes en fonction; que la première intervention de l'expérimentateur a consisté à détruire certains organes pour en apprécier le rôle d'après les troubles consécutifs à leur destruction; mais ce n'est là qu'une première phase dans l'étude physiologique. Il ne suffit pas de savoir que le sang circule, il faut savoir comment il circule; ce n'est pas assez de prouver que certains nerfs sont sensitifs ou moteurs, il faut montrer comment s'exécute la fonction de ces nerfs, ce qui la rend plus lente ou plus rapide, plus faible ou plus énergique. C'est là qu'intervient la mesure et que s'impose le besoin d'appareils précis.

Les sciences, dans leur évolution, traversent les mêmes phases. La chimie fournit, à cet égard, un exemple frappant. Elle commença à distinguer les corps simples par leur aspect extérieur, leurs propriétés physiques, leur solubilité, leur fusibilité; puis elle les mit en présence les uns des autres, nota les combinaisons qui se produisaient, l'aspect des nouveaux corps formés, les changements de couleur qui accompagnaient ces réactions, l'effervescence, les précipités, les variations de température, etc. Ces signes extérieurs suffisaient déjà pour caractériser les différentes substances et pour faire l'analyse qualitative d'un mélange quelconque.

Mais quand les besoins de l'analyse quantitative eurent imposé l'emploi de la balance, on reconnut bientôt que les corps se combinent en proportions définies, et la loi des équivalents chimiques se dégagait. Plus tard, on vit qu'un courant électrique, traversant à la fois différents sels, met en liberté, dans chacun d'eux, des proportions équivalentes des corps qui les constituaient. Dès lors, ce qu'on nommait affinité chimique se rattacha aux autres forces de la nature; l'affinité devint mesurable puisqu'on pouvait la compenser par une quantité connue d'énergie agissant sous une autre forme. Plus tard encore, les phénomènes de la dissociation mesurèrent cette affinité d'après le degré de pression nécessaire pour maintenir certains corps à l'état de combinaison.

La calorimétrie, à son tour, montra que l'énergie thermique se conserve à travers les compositions et les décompositions des corps, à moins qu'il ne se produise un travail mécanique extérieur absorbant de la chaleur. Les lois de la thermo-dynamique, se révélant chaque jour avec plus de clarté dans les réactions de la chimie, montrent que cette science se rattache à la mécanique générale dont elle représenterait un cas particulier : la mécanique des atomes.

De même, en biologie, lorsque l'observation successive des différents phénomènes de la vie eut permis de déterminer les caractères propres à chacun d'eux, on reconnut qu'entre ces phénomènes divers il existait certaines analogies qui autorisaient à leur attribuer une cause commune. De là vint la conception de forces qu'on a appelées *vitales*, parce qu'on en voyait les effets sur des êtres vivants; or, parmi ces forces dites vitales, il en est un grand nombre qui ne sont que des forces physiques et mécaniques.

Si l'on parvenait à s'en convaincre, on suivrait dans l'étude de la vie une marche toute différente et bien plus fructueuse que celle qui consiste à observer empiriquement et sans idées préconçues ce qui se produit dans les mille conditions diverses que peut réaliser l'intervention de l'expérimentateur.

Et, de même que le chimiste, en partant des lois générales, est arrivé non seulement à comprendre les réactions déjà connues, mais à en prévoir d'autres et à former des corps nouveaux par voie synthétique, de même le biologiste, partant de ces mêmes lois, expliquera facilement certains actes de la vie qui, autrefois, paraissaient mystérieux; bien plus, il pourra émettre des prévisions et chercher, avec le ferme espoir de les trouver, des phénomènes que le hasard ne lui eût peut-être jamais fait découvrir.

En effet, quoi qu'on ait pu dire sur les avantages qu'il y a pour l'expérimentateur de n'avoir pas d'idée préconçue, il est démontré, par des exemples innombrables, qu'on laisse souvent échapper les phénomènes qu'on ne s'attendait pas à rencontrer, et que l'obser-

vation est bien plus intense et bien plus fructueuse quand le chercheur sait d'avance ce qu'il doit trouver, et qu'il s'acharne à le trouver malgré de premiers succès.

La biologie peut donc aussi procéder par la méthode synthétique et provoquer des phénomènes qu'elle aura prévus, à titre de conséquences nécessaires des lois générales.

Pour faire ressortir les avantages de cette méthode, rappelons les tentatives récentes qui ont été faites pour transporter dans la biologie la conception moderne de l'équivalence des forces et de la conservation de l'énergie. Deux exemples frappants peuvent être cités : l'un est relatif à la thermo-dynamique, l'autre à l'électro-dynamique.

A peine les mécaniciens avaient-ils formulé et vérifié par l'expérience les transformations réciproques de la chaleur et du travail, qu'un physiologiste français, J. Béclard, chercha en biologie la vérification des lois de la thermo-dynamique; il présuma que la production du travail musculaire devait s'accompagner de la disparition d'une certaine quantité de chaleur sensible dans le muscle.

Les expériences thermométriques de Béclard étaient faites avec des moyens insuffisants pour démontrer clairement le phénomène de la transformation de la chaleur en travail, mais elles étaient conçues d'une manière rationnelle et traçaient la marche à suivre dans des recherches ultérieures.

Hirn basa ses expériences sur la calorimétrie : partant de ce principe, autrefois admis, que les produits de l'exhalation pulmonaire donnaient exactement la mesure des actions chimiques d'où naissent la chaleur et le travail chez les animaux, il vit qu'à égale production d'acide carbonique et de vapeur d'eau, un homme, quand il travaille, fait moins de chaleur que lorsqu'il est en repos. Et si les déterminations numériques obtenues par Hirn ne lui ont pas permis d'établir un rapport d'équivalence entre le travail produit et la chaleur disparue, le sens du phénomène a, du moins, été, dans toutes ses expériences, celui que la théorie faisait prévoir. Enfin, les travaux de Hirn montrent quelles précautions on peut prendre contre soi-même quand on craint de se laisser influencer dans l'observation par une idée préconçue : ce savant ne fit aucune de ses déterminations numériques avant d'avoir entièrement terminé ses expériences.

Les phénomènes réversibles d'électro-dynamique découverts par les physiciens, et qui consistent en transformation du travail mécanique en électricité et d'électricité en travail mécanique au moyen de machines appropriées, ont fait supposer aux physiologistes que, dans les êtres vivants, il se pouvait produire des transformations du même genre.

On savait que l'électricité appliquée aux muscles y

provoque la contraction, c'est-à-dire la production de travail mécanique, et l'on savait aussi que le muscle qui travaille présente un changement dans son état électrique. D'autre part, en comparant les muscles aux organes électriques de certains poissons, on avait reconnu des analogies morphologiques. Enfin, en étudiant la fonction de ces deux sortes d'organes, on avait constaté que tous deux fonctionnent de la même manière, l'un pour produire du travail, l'autre pour faire de l'électricité.

Ces analogies prenaient une signification très claire après les découvertes des électriciens; mais comment concevoir le mécanisme de ces transformations, lorsque rien dans la structure des muscles ou de l'appareil des poissons électriques ne rappelle la disposition des machines créées par les physiciens?

La découverte récente des phénomènes électro-capillaires par M. Lippmann est venue fournir aux biologistes une explication assez naturelle des transformations réciproques de l'électricité et du travail mécanique chez les animaux.

De même qu'un globule de mercure plongé dans l'eau acidulée change d'état électrique quand on le déforme mécaniquement, et inversement change de forme en faisant du travail mécanique lorsqu'on modifie sa tension électrique superficielle; ainsi, des molécules organiques de constitutions différentes peuvent, par leur changement de forme, donner lieu à des variations électriques et inversement, sous l'influence de l'électricité, modifier leur forme et faire du travail.

Telle a été, du moins, l'idée qui a conduit M. d'Arsonval dans une série d'expériences qui ont confirmé plusieurs de ses prévisions. Elles ont montré qu'en imprimant à un muscle des mouvements passifs, on y provoque des variations électriques semblables à celles qui accompagnent les mouvements fonctionnels. D'autre part, la théorie de l'appareil électrique de la torpille considérée comme transformant du travail mécanique en électricité a trouvé sa confirmation dans le fait suivant. Quand on prend, dit M. d'Arsonval, un fragment de l'organe électrique d'une torpille et qu'on le place entre deux plaques de métal reliées à un galvanomètre, si l'on comprime cet organe entre les plaques, le galvanomètre signale un courant électrique; inversement, si on le décomprime en écartant les plaques, il se produit un courant de sens inverse dans le galvanomètre.

Bien que les tentatives des biologistes pour démontrer chez les êtres vivants les transformations réciproques de la chaleur, du travail mécanique et de l'électricité ne soient encore qu'à leur début, elles ont déjà donné d'importants résultats. Or, sans idée directrice on n'eût peut-être jamais observé les curieux phénomènes que les biologistes ont découverts, presque sans tâtonnements, en orientant leurs recherches dans le sens indiqué par la théorie générale.

La méthode inductive est susceptible d'applications très nombreuses en biologie. Nous essayerons de le prouver par quelques exemples.

Borelli a montré que les muscles produisent des efforts d'autant plus grands qu'ils ont une section transversale plus étendue au niveau de leur partie charnue; il a prouvé, d'autre part, que le raccourcissement des muscles est d'autant plus grand que leurs fibres rouges sont plus longues.

Aujourd'hui que la notion de *travail mécanique* est nettement formulée, on dirait que le travail d'un muscle, c'est-à-dire le produit de sa force multipliée par le chemin parcouru, est proportionnel aux trois dimensions de ce muscle, c'est-à-dire à son volume ou, ce qui est la même chose, à son poids.

Mais une même quantité de matière musculaire peut affecter des formes différentes: elle peut s'allonger en bandelette longue et grêle ou se ramasser en faisceau gros et court. Le même travail sera fourni dans les deux cas, mais il affectera des formes différentes. On sait, en effet, que l'unité de travail, le kilogrammètre, peut être effectuée sous différentes formes, soit en élevant 1 kilogramme à un mètre, ou bien 10 kilogrammes à 0<sup>m</sup>,10, ou encore 100 grammes à 10 mètres de hauteur.

Du poids et de la forme d'un muscle on pourra donc déduire à la fois l'importance du travail qu'il est apte à produire et la forme sous laquelle il produit ce travail. Toute la morphologie des muscles se trouve ainsi expliquée, ou du moins ramenée à une harmonie admirable dans laquelle le volume et la forme des muscles sont toujours en rapport avec les caractères de leur fonction.

Nous avons exposé ailleurs (1) comment l'anatomie humaine et l'anatomie comparée confirment, pour chaque muscle, l'existence de cette relation. Nous avons même affirmé qu'à la seule inspection de l'amplitude énorme des mouvements du vol chez les oiseaux à faible surface d'aile, et de la faible amplitude de ces mouvements chez les oiseaux dont l'aile offre une grande surface, on pouvait prévoir que ces espèces différentes font le travail du vol sous deux formes différentes et prévoir que les espèces pourvues d'ailes étroites avaient des pectoraux longs et grêles, tandis qu'aux ailes larges correspondraient des pectoraux gros et courts. L'examen des formes musculaires chez les oiseaux appartenant à ces deux types opposés a pleinement confirmé ces prévisions.

Chez les mammifères, les mêmes différences morphologiques des muscles expriment pareillement la forme sous laquelle ces muscles effectuent leur travail. Aux exemples que j'ai déjà donnés à l'appui de cette loi, permettez-moi d'en ajouter un autre que je viens de constater il y a quelques instants.

On sait que le nègre n'a pas de mollets, c'est-à-dire

(1) *La Machine animale*, ch. viii. Paris, 1886.

que ses gastro-cnémiens sont longs et minces, se prolongeant en bas aux dépens du tendon d'Achille, au lieu de former, comme chez l'homme blanc, une masse volumineuse en haut de la jambe. Or le nègre possède une aptitude incontestable à la marche; ses muscles gastro-cnémiens, s'ils ont peu de volume transversal, et par conséquent peu de force, doivent donc effectuer leur travail avec des mouvements étendus. Dans ce cas, le calcanéum du nègre doit être plus long que celui du blanc. Cette supposition semblait justifiée par les caractères

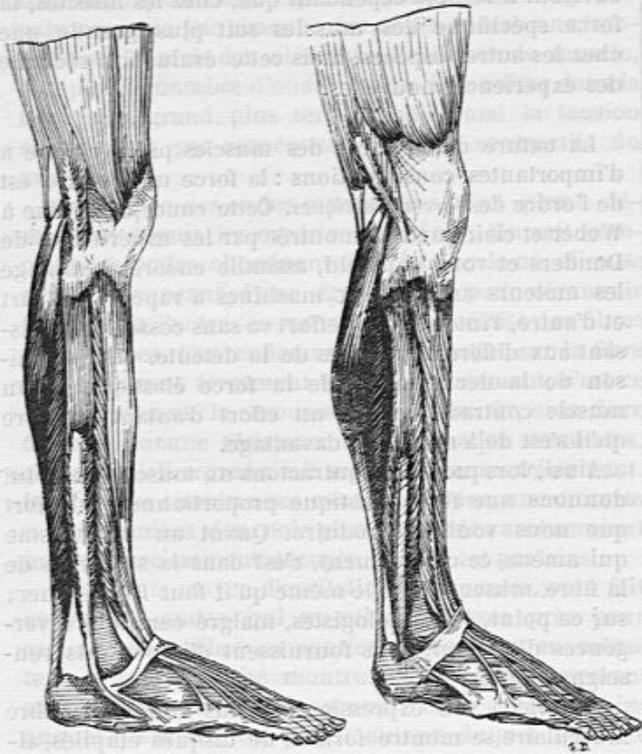


Fig. 1.  
Muscles de la jambe d'un nègre.

Fig. 2.  
Muscles de la jambe d'un blanc.

ères anthropologiques assignés au nègre, chez qui le talon se porte, dit-on, plus en arrière que chez le blanc. J'ai tenu à vérifier directement mes prévisions sur les squelettes du musée de la Société d'anthropologie. De cet examen il résulte que la longueur moyenne du calcanéum du nègre serait à celle du même os chez le blanc dans le rapport de 7 à 5.

Ainsi, la singulière conformation des muscles gastro-cnémiens du nègre s'allie à une particularité non moins remarquable de son calcanéum. Aucun muscle, sans doute, ni aucun os ne présentent chez le blanc et chez le nègre de pareilles différences. Il serait peu logique d'attribuer au hasard une relation qui s'explique naturellement par l'harmonie nécessaire entre l'organe et sa fonction.

J'ai discuté autrefois la question de savoir si cette

harmonie est préétablie dans le plan de la création, comme le professait l'ancienne école, ou si les modifications imposées aux fonctions des animaux par les conditions dans lesquelles ils vivent ont réagi graduellement sur la forme de leurs muscles et de leurs os. Certaines observations anatomo-pathologiques dues à J. Guérin montrent que cet éminent observateur avait vu les changements qui se produisent dans un muscle quand une ankylose articulaire plus ou moins incomplète en limite les mouvements. Le muscle, dit Guérin, subit alors partiellement la dégénérescence fibreuse; son tendon augmente de longueur aux dépens de la fibre rouge.

La conception d'une harmonie nécessaire entre la forme du muscle et sa fonction m'a fait exprimer le même phénomène par une autre formule: au lieu de considérer comme pathologique la transformation du muscle, j'y ai reconnu l'adaptation de sa forme aux nouvelles conditions dans lesquelles il produit son travail. Depuis lors, un physiologiste allemand, M. W. Roux, a confirmé mes vues par de nombreuses dissections de muscles sur différentes espèces animales.

L'expérimentation sera le moyen direct de vérifier la réalité des changements de forme que subit un muscle quand on a modifié les conditions de son travail. Or voici l'expérience que je me propose d'exécuter prochainement.

Le lapin a le calcanéum long; ses gastro-cnémiens minces et allongés rappellent par leur disposition celle qui existe chez le nègre. On réséquera sur un jeune lapin une partie du calcanéum, de manière à réduire cet os à la moitié de sa longueur par exemple. En modifiant ainsi le moment d'action du gastro-cnémien, on le forcera à exécuter des efforts plus grands avec des raccourcissements moindres. Si la théorie est juste, les gastro-cnémiens, au bout de quelques mois, se seront développés en épaisseur, tandis que la longueur de leurs fibres actives aura diminué pour faire place à un tendon plus long que sur le lapin normal.

Cette expérience exigera un temps assez long pour être réalisée; mais l'observation générale de la relation des formes musculaires avec la nature des mouvements me donne dès aujourd'hui la conviction que le changement prévu se produira.

Je ne saurais trop engager ceux d'entre vous qui s'occupent d'anatomie comparée à faire de leur côté des expériences analogues; ils y trouveront, j'en suis certain, l'explication des variétés morphologiques du système musculaire dans la série animale, le véritable lien qui rattache les formes extérieures des animaux aux conditions dans lesquelles ils vivent.

La relation qui vient d'être signalée entre la forme du muscle et la forme de son travail rappelle de tous points celle qui, dans la machine à vapeur, règle la forme du cylindre et le met en harmonie avec la forme

du travail qu'il s'agit d'obtenir. Une machine doit avoir un cylindre large et court, ou bien long et étroit, suivant qu'elle devra, avec un même volume de vapeur, produire un grand effort avec peu de déplacement, ou un petit effort avec un déplacement étendu.

Mais pour que deux cylindres de capacités semblables et de formes différentes produisent la même quantité de travail, une condition est nécessaire, c'est que, dans l'un comme dans l'autre, la vapeur ait la même pression. Sans cela, à volume égal du cylindre, la machine à haute pression produira plus de travail que l'autre. Or cette pression de vapeur qui se traduit par un effort plus ou moins grand sur chaque élément de la surface du piston a son analogue dans le système musculaire : c'est ce qu'on appelle la *force spécifique des muscles*, c'est-à-dire l'effort développé par chaque centimètre carré de leur surface de section.

On a admis, d'après certaines observations, que les animaux sont inégalement doués au point de vue de la force spécifique de leurs muscles, comme si certains d'entre eux représentaient des machines à haute pression et d'autres, des machines à basse pression.

Ce qui paraît avoir donné naissance à cette supposition, c'est que les petits animaux exécutent des sauts très étendus proportionnellement à leur taille. Une puce, par exemple, en faisant un saut de 0<sup>m</sup>,50, s'élève à 400 ou 500 fois sa hauteur, tandis qu'un homme en franchissant un obstacle de 0<sup>m</sup>,50 ne s'élève pas même au tiers de sa hauteur.

Cette manière d'estimer la puissance des muscles est essentiellement vicieuse; on la corrige aisément si l'on considère la relation du volume des muscles avec le travail qu'ils effectuent.

Imaginons deux êtres vivants de tailles différentes et de force musculaire spécifiquement égale. L'un de ces animaux aura un mètre de hauteur et l'autre un décimètre seulement. Les poids de ces deux êtres seront dans le rapport des cubes de leurs dimensions linéaires; le petit sera donc 1000 fois moins pesant que le grand. Dans le petit animal, les muscles, quels qu'ils soient, qui président au saut seront 1000 fois plus petits que chez le grand et par conséquent feront 1000 fois moins de travail.

Or, si ces deux animaux exécutent un saut vertical, ils devront s'élever tous deux à égale hauteur, à 0<sup>m</sup>,50, par exemple. En effet, le petit animal, élevant à cette hauteur un poids 1000 fois moindre que l'autre, aura effectué un travail 1000 fois moindre, c'est-à-dire celui qui, à égale force spécifique, correspond à ses muscles 1000 fois moins volumineux que ceux du grand animal.

La mesure de la force spécifique des muscles chez les différentes espèces a beaucoup préoccupé les physiologistes, mais elle est très difficile à effectuer, car la contraction dont on mesure l'effort est nécessairement provoquée par des excitations artificielles, et en pareil

cas on ne peut jamais savoir si l'effort que produit le muscle est supérieur ou inférieur à celui que la volonté commande dans les conditions normales du travail musculaire. Malgré ces circonstances défavorables, les mesures effectuées montrent que l'homme, les autres mammifères, les grenouilles, les oiseaux possèdent une force spécifique à peu près égale; cette force varie de 1000 à 1400 grammes pour l'effort de chaque centimètre carré de section des muscles. On pourrait donc assimiler l'appareil moteur des animaux aux machines à vapeur où la pression est d'une atmosphère et demie environ. Il semble cependant que, chez les insectes, la force spécifique des muscles soit plus grande que chez les autres espèces; mais cette évaluation réclame des expériences nouvelles.

La nature de la force des muscles prête encore à d'importantes considérations : la force musculaire est de l'ordre des *forces élastiques*. Cette conception, due à Weber et clairement démontrée par les expériences de Donders et von Mansveld, assimile encore davantage les moteurs animés aux machines à vapeur; de part et d'autre, l'intensité de l'effort va sans cesse en décroissant aux différentes phases de la détente. C'est en raison de la décroissance de la force élastique qu'un muscle contracté exerce un effort d'autant moindre qu'il s'est déjà raccourci davantage.

Ainsi, lorsque nous contractons un muscle, nous lui donnons une force élastique proportionnée à l'effort que nous voulons produire. Quant au mécanisme qui amène ce changement, c'est dans la structure de la fibre musculaire elle-même qu'il faut le chercher; sur ce point, les histologistes, malgré certaines divergences d'opinion, nous fournissent d'importants enseignements.

Réduite à son expression la plus simple, la fibre musculaire se montre formée de disques empilés, alternativement mono-réfringents et bi-réfringents : de là son apparence striée. Ces disques changent d'aspect dans les points où naît la contraction, une onde s'y produit, et, dans la partie ventrale de cette onde, les disques se pressent les uns contre les autres et gagnent en largeur. Cette compression, dans le sens longitudinal, rend la striation plus fine dans la partie la plus contractée. Or Engelmann a trouvé que cette condensation ne se produit pas également sur les deux sortes de disques, que la matière mono-réfringente la subit à un degré plus fort, et en estimant les volumes relatifs des deux sortes de disques d'après l'épaisseur de leur tranche, cet éminent physiologiste a admis que les disques bi-réfringents augmentaient de volume aux dépens des autres, par l'effet d'une endomose passagère de liquide. Ranvier, en opérant sur des fibres musculaires fixées à leurs deux extrémités, a vu que les actes de la contraction donnent à la striation du muscle une apparence particulière. Les dis-

ques mono-réfringents s'aplatissent en s'élargissant, tandis que les bi-réfringents s'amincissent en s'allongeant. Sous cet aspect nouveau, la fibre musculaire, qu'un obstacle empêche de se mouvoir, révèle sa tendance au raccourcissement comme une conséquence naturelle de la force élastique des éléments bi-réfringents qui ont subi un tiraillement suivant leur longueur. Ce serait là, d'après Ranvier, l'origine de la force motrice du muscle.

Cela posé, quand une série d'excitations successives met les fibres musculaires en état de tétanos ou de contraction, on conçoit que la condensation longitudinale produite par chacune des ondes exerce une traction sur la série des éléments élastiques du muscle, que plus le nombre d'ondes qu'on fera naître dans la fibre sera grand, plus sera grande aussi la tension élastique, et, par conséquent, la force contractile du muscle.

L'existence des ondes musculaires n'est plus à démontrer depuis les expériences d'Aeby. On sait comment ces ondes cheminent dans le muscle où elles se suivent, avançant d'une égale vitesse pour s'évanouir l'une après l'autre en arrivant à l'extrémité des fibres musculaires. Ces renflements qui naissent sur la fibre en produisent forcément le raccourcissement, c'est ce qu'on a nommé la secousse musculaire. Or, si la fibre n'offrait aucune résistance à la formation des ondes, chacune d'elles produirait un même raccourcissement. Deux ondes simultanées contenues dans une fibre la raccourciraient deux fois plus, dix ondes amèneraient un raccourcissement décuple. Il n'en est pas ainsi.

Quand, au moyen d'excitations fréquentes, on a fait naître des ondes qui se suivent d'assez près pour qu'une même fibre en contienne plusieurs en même temps, le myographe montre que le raccourcissement atteint d'une manière progressive et saccadée le point auquel il s'arrête, ou plutôt autour duquel il oscille d'une manière régulière tant que durent les excitations intermittentes. Si nous suivons dans ses phases diverses l'établissement de ce régime régulier du phénomène, nous voyons qu'à partir de la première excitation, chacune des secousses successives amène un raccourcissement de plus en plus petit; que ces raccourcissements sont suivis de retours partiels du muscle vers sa longueur primitive, retours qui sont de plus en plus étendus à mesure que le muscle est plus raccourci et qui finissent par compenser exactement le raccourcissement produit par chaque nouvelle secousse. A ce moment, le phénomène ne changera plus et la longueur du muscle oscillera autour de deux limites constantes, tant que se conservera la fréquence des excitations.

La manière dont varie la longueur de la fibre implique l'existence de deux forces antagonistes : l'une intermittente, celle qui tend à raccourcir la fibre chaque fois qu'une onde s'y produit ; l'autre, continue et

dont l'intensité croît avec la déformation que la fibre a déjà subie : c'est la force élastique des éléments passifs du muscle. L'une des deux forces tend sans cesse à neutraliser les effets de l'autre, et quand, dans sa variation croissante, la force élastique arrive à compenser la force contractile, le régime régulier du phénomène est obtenu.

On pourrait citer un grand nombre de cas où s'établit ainsi une lutte de deux forces, l'une intermittente, et l'autre continue et de valeur croissante ; l'effet résultant de ces forces arrive plus ou moins vite à un régime régulier.

Tels sont les changements de niveau d'un réservoir qui reçoit de l'eau d'une manière intermittente et la déverse par un écoulement continu, dont l'abondance augmente à mesure que le niveau s'élève, de sorte qu'il finit par compenser l'afflux. Telles sont aussi les

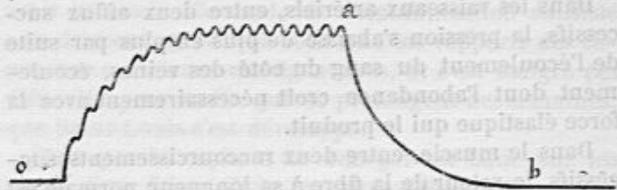


Fig. 3. — Phases de l'établissement du régime régulier d'un phénomène ; *oa* action combinée de la force intermittente et de son antagoniste continue et croissante ; *ab* la force intermittente cesse d'agir.

variations de la température d'un corps soumis, d'une part, à des échauffements intermittents et, d'autre part, à un rayonnement continu de chaleur.

En biologie, le premier exemple d'un phénomène de ce genre qui ait frappé mon attention, c'est la manière dont s'élève la pression dans les branches d'une artère qu'on a comprimée quelques instants et que l'on cesse brusquement de comprimer.

Pendant la compression du vaisseau, le sang des branches qui en naissent s'écoulait par les capillaires dans le système veineux et la pression y tendait graduellement vers zéro. Aussitôt la compression levée, le sang pénètre dans l'artère par afflux saccadés, et la pression manométrique s'élève dans le vaisseau par degrés successifs. Or l'élévation de la pression offre ce caractère, que les ascensions successives de la courbe sont toujours de plus en plus petites et que chacune est suivie d'une descente de plus en plus grande ; quand les ascensions et les descentes, variant en sens inverse l'une de l'autre, sont arrivées à l'égalité, le régime régulier de la circulation est rétabli et persiste indéfiniment.

Dans ce phénomène, tout peut se mesurer ; la nature des forces en présence est parfaitement connue ; on peut même, en dehors de l'animal vivant, reproduire sur des tubes élastiques, où l'on fait circuler un liquide, les variations de pression que nous venons de

décrire. Le mécanisme de la circulation est donc éminemment apte à éclairer celui de la fonction musculaire, en y révélant les phases de la lutte entre deux forces antagonistes. Essayons de tirer, de la comparaison de ces fonctions, quelques éclaircissements sur le mécanisme de la contraction musculaire.

Dans les vaisseaux qui se remplissent par afflux intermittents, si les élévations de la pression vont toujours en décroissant, c'est que la pénétration du sang y est de moins en moins abondante, entravée qu'elle est par la force élastique croissante des parois vasculaires de plus en plus distendues.

Dans le muscle, si le raccourcissement produit par chacune des ondes successives va toujours en décroissant, c'est que la force contractile des éléments actifs est entravée par la résistance croissante des éléments élastiques, de plus en plus éloignés de leur position d'équilibre (1).

Dans les vaisseaux artériels, entre deux afflux successifs, la pression s'abaisse de plus en plus par suite de l'écoulement du sang du côté des veines, écoulement dont l'abondance croît nécessairement avec la force élastique qui le produit.

Dans le muscle, entre deux raccourcissements successifs, le retour de la fibre à sa longueur normale est d'autant plus accentué que la force élastique a atteint une valeur plus grande par la déformation déjà atteinte.

Enfin, quand le régime régulier est établi dans la pression du sang, comme dans le raccourcissement du muscle, c'est que les deux forces antagonistes se compensent exactement. Dans le vaisseau, chaque pénétration nouvelle de sang est compensée par l'écoulement d'une quantité égale de sang du côté du système veineux. Dans le muscle, chaque raccourcissement nouveau produit par la naissance d'une onde est compensée par l'évanouissement d'une autre onde.

Enfin, pour achever le parallèle, supprimons l'arrivée du sang dans l'artère et arrêtons les excitations intermittentes du muscle; nous verrons, dans les deux cas, la force élastique s'exercer toute seule et produire des effets semblables. La pression dans l'artère reviendra à zéro, et la longueur du muscle à sa valeur primitive.

(1) La force élastique des éléments musculaires ne doit pas seulement être considérée comme tendant à les raccourcir quand ils ont été allongés, mais aussi comme tendant à les allonger quand ils ont été raccourcis. En effet, en vertu de la solidarité des deux sortes de disques superposés qui alternent dans la structure du muscle, les disques actifs, lorsqu'ils s'aplatissent et s'étalent en largeur, imposent, à certain degré, une déformation semblable aux disques élastiques. Cette tension transversale, ou par élargissement des éléments musculaires, fera donc naître une force élastique tendant à les resserrer, c'est-à-dire à effacer l'onde en ramenant la fibre à sa forme cylindrique et à sa longueur normale.

J'ai longuement insisté, messieurs, sur ces exemples et je les soumets à vos méditations, car rien n'est plus fréquent dans les phénomènes de la vie que ces actes vibratoires nés du conflit de deux forces, dont l'une est intermittente et l'autre continue. Vous les retrouverez dans l'ordre de la sensibilité comme dans celui du mouvement, dans la production de l'électricité, de la lumière et peut-être de la chaleur chez les animaux.

D'après la manière dont s'engendre la force élastique des muscles, on conçoit que cette force doive mettre un certain temps pour atteindre sa valeur maxima, car il faut pour cela que le muscle contienne un certain nombre d'ondes, et ces ondes ne naissent que successivement. Ainsi, un muscle qui entre en contraction exercera un effort graduellement croissant contre l'obstacle qu'il devra surmonter, bien différent, en cela, d'un ressort élastique bandé qui, dès le début de sa détente, possède le maximum de sa force élastique.

Si nous voulions placer un muscle dans les conditions d'un arc bandé qui se détend avec violence, il faudrait opposer à l'effort de ce muscle un obstacle contre lequel il se tendrait graduellement; puis, quand il aurait acquis toute sa force, on enlèverait soudainement l'obstacle, et on verrait alors le muscle agir avec une extrême brusquerie. C'est ce qui arrive dans le mécanisme de la chiquenaude.

Nous sauterions certainement très haut si, retenus d'abord dans la position accroupie par un lien résistant, nous faisons un violent effort qui amènerait la rupture de ce lien. Les muscles extenseurs de nos jambes, au moment où ils seraient libres de se raccourcir, auraient acquis déjà une tension très forte et, continuant leur action, projetteraient violemment la masse de notre corps. En pratique, nous faisons quelque chose d'analogue: vous verrez, quand nous analyserons les différents actes de la locomotion, que le saut, pour atteindre une grande hauteur, doit être précédé d'une brusque flexion des jambes, flexion à la fin de laquelle nos muscles se raidissent pour arrêter notre chute. Ils sont donc déjà en état de contraction complète quand commence à se produire l'extension des jambes qui projettent la masse de notre corps. Cette préparation au mouvement par un acte de sens contraire s'observe toutes les fois que nous voulons obtenir un effort intense ou un mouvement rapide, qu'il s'agisse de lancer une pierre ou de manier un outil. L'éducation instinctive de notre appareil musculaire nous conduit à produire des actes dont l'explication se trouve dans le mécanisme intime de la contraction.

Et maintenant, messieurs, que nous connaissons, dans ses traits essentiels, la manière dont s'engendre la force des muscles, nous la suivrons dans ses effets mécaniques, c'est-à-dire dans les différents actes de la locomotion; nous verrons que la force musculaire, quand

elle entre en lutte avec les autres forces, telle que la pesanteur, l'inertie des masses, la résistance des milieux, suit exactement les lois générales de la mécanique. Nous apprendrons enfin à mesurer le travail dépensé dans les différents actes de nos muscles et à régler leur action, de manière à réduire cette dépense au strict nécessaire. C'est le but auquel la pratique conduit inconsciemment chacun de nous par de longs tâtonnements, mais que l'on peut atteindre plus sûrement et plus vite par une éducation méthodique des actes de la locomotion.

MAREY,  
de l'Institut.

## TRAVAUX PUBLICS

### La barre du Sénégal.

Le projet d'améliorer la barre du Sénégal a paru, au bureau de la Société des études maritimes, mériter l'appui qu'il a toujours chaleureusement donné aux créations qui pouvaient favoriser l'extension de notre commerce; aussi c'est fort de son assentiment que je vais essayer de vous faire partager ma conviction que de plus grandes profondeurs peuvent être obtenues facilement à l'embouchure du fleuve et que les intérêts de notre colonie ainsi que ceux de nos armateurs en bénéficieront dans une large mesure.

Il s'agit, en effet, de mettre fin à une situation fâcheuse à tous les points de vue, car nous ne pouvons admettre aujourd'hui que des navires arrivant huit jours après leur départ de France devant l'embouchure d'un fleuve y attendent plusieurs semaines le moment propice pour y entrer. Il y a du fait de ce retard un excédent de dépense qui constitue une anomalie extraordinaire au milieu de l'abaissement général des prix des frets et qui lèse tous les intérêts.

Aujourd'hui, si un voyageur venant d'Europe veut arriver vite à Saint-Louis, capitale et port de commerce de notre colonie, le mieux qu'il puisse faire est d'aller débarquer à soixante lieues dans le sud à Dakar, où l'accostage est facile, puis de prendre le chemin de fer et, après douze heures pendant lesquelles il a fait deux cent cinquante-huit kilomètres, il arrive au port dont il pouvait apercevoir le feu l'avant-veille en longeant la côte de Barbarie.

Ce serait le fait de voyageurs venant d'Amérique et débarquant à Cherbourg pour arriver plus vite à Brest, ou à Calais pour se rendre à Cherbourg. Si ce passager a des marchandises et s'il veut les accompagner *en suivant leur fortune*, il n'empruntera point à Dakar la voie ferrée, qui lui ferait payer un triple fret, mais il arri-

3<sup>e</sup> SÉRIE. — REVUE SCIENTIFIQUE. — XXXVIII.

vera directement devant l'embouchure du fleuve, et généralement il apercevra tout au loin un pavillon bleu hissé sur un mât; ce signal indique que la barre du fleuve est impraticable. Le capitaine mouille alors son navire devant cette barre dont les brisants signalent la place, et, balancé par la houle, il attend qu'un pavillon bleu et jaune lui indique que les pilotes *tâtent* la barre, et qu'un pavillon jaune lui dise de la traverser. Ce pavillon jaune est resté quelquefois, dit-on, deux mois sans être hissé.

Jadis, je veux dire il y a deux ans, lorsque les paquets postaux n'avaient point d'autre voie pour arriver à Saint-Louis que celle de la mer, si le pavillon bleu était hissé à l'arrivée du courrier, on expédiait du gouvernement des nègres dans une pirogue, et moitié payant, moitié à la nage, chavirant souvent et quelquefois, dit-on, décimés par les requins, ils finissaient par rapporter à terre le rouleau de fer-blanc qui leur avait été remis. Ce mode de communication subsiste actuellement en ce qui concerne les rapports des capitaines avec leurs consignataires, et c'est malgré ces difficultés, ces arrêts qui se prolongent des semaines, que Saint-Louis s'est développé.

C'est que la capitale du Sénégal est bâtie sur les bords d'un fleuve dont le cours s'étend à l'est à des centaines de lieues, qu'il y a là une voie dont on peut user pendant six mois, et que les relations y prennent chaque année plus d'extension depuis que, grâce au colonel Faidherbe, l'influence française y est devenue dominante. Le moment n'est-il donc point arrivé de lever cette barrière matérielle qu'offre l'embouchure du fleuve aux navires?

Nous étions persuadés, il y a vingt ans, de la possibilité de le faire en appliquant une théorie alors nouvelle; aujourd'hui notre conviction est fortifiée par ce que nous avons vu et entendu sur les lieux, ou par ce que nous avons lu; je vais donc vous exposer rapidement un ensemble des données relatives au fleuve et à la mer, qui vous permettront de saisir à la fois le problème et la solution qui en est donnée.

Comme ce sont les pluies qui font le fleuve et que les vents donnent à la houle le caractère original qui produit la barre, je parlerai tout d'abord du régime météorologique.

Il est simple dans les parages du Sénégal; le vent y souffle des points voisins du nord pendant les trois quarts de l'année; ce n'est pas un vent battant en côte; tout au plus il atteint parfois la direction même du littoral. Ce vent caractérise la saison sèche qui va de novembre à mai; puis viennent les brises variables, on a, de l'ouest et du sud-ouest, petit temps humide plutôt que pluvieux, car la hauteur de l'eau qui tombe annuellement sur la côte est moindre que celle recueillie par les udomètres en beaucoup de stations en France.

Il en est bien autrement dans l'intérieur de la colo-

1. s.