

Du mouvement dans les fonctions de la vie

Étienne-Jules

Marey

Gloubik Éditions

2019



Enseignement libre : physiologie médicale

(le cours a lieu tous les mercredis, à deux heures, dans le laboratoire particulier de M. Marey, ancien Théâtre-Français, 14, rue de l'Ancienne-Comédie),

Étienne-Jules MAREY, de l'Institut

Ce cours a été publié en 7 parties dans *La Revue Scientifique* des 3 et 17 février, 14 et 21 avril, 19 mai, 14 et 21 juillet 1866

1 Exposition du sujet et de la méthode

Messieurs,

Dans les sciences physiques, on a coutume d'étudier les corps sous deux états différents : le repos et le mouvement ; l'état statique et l'état dynamique. Deux sciences parallèles ont été fondées en conséquence de cette distinction : l'une la statique, considère les corps à l'état de repos, apprécie leur forme géométrique, leurs conditions d'équilibre, etc. ; l'autre, la dynamique, étudie les mêmes corps en mouvement, et cherche les lois qui président à tous les changements d'état que peut présenter la matière. Inséparables mais distinctes, ces deux sciences sont sœurs ; le physicien passe sans cesse de l'une à l'autre, et c'est par leur double concours qu'il obtient la solution des problèmes mécaniques ou physiques, – dont les applications constituent tous les progrès de l'industrie. Dans notre science médicale nous trouvons les mêmes divisions du sujet, les mêmes

distinctions dans l'étude. L'anatomie en effet correspond à la statique animale ; elle nous enseigne la forme et les rapports des différents organes, la constitution intime de leurs tissus ; c'est-à-dire leur histologie, tandis que la physiologie, véritable dynamique animale, nous montre les organes en fonction, nous pourrions dire en mouvement. Qu'est-ce en effet que le mouvement fonctionnel, sinon l'ensemble presque complet des phénomènes de là vie ?

Plus la science progresse, plus elle nous révèle de nombreux mouvements dans l'organisme. La marche et l'acte musculaire, voilà le mouvement dans sa manifestation la plus simple ; mais à côté de cette grande fonction essentiellement dynamique, on peut voir que toutes les autres empruntent au mouvement leur caractère objectif principal, sinon leur essence même. La respiration consiste, il est vrai, en un échange continu de gaz entre le sang et l'air qui nous environne : mais cette fonction exige, pour s'accomplir, l'action incessamment alternante de forces antagonistes qui appellent l'air dans la poitrine, et l'en expulsent tour à

tour. L'hydrodynamique montre, dans la circulation du sang, que toutes ses lois régissent cette fonction organique, de telle sorte que, sur ce point ; chaque progrès accompli complète davantage la fusion de la dynamique et de la physiologie. Que voit-on enfin dans toute expérience, dans toute vivisection ? des mouvements produits par l'excitation des nerfs, par l'irritation directe des muscles de la vie organique ou de la vie animale, des mouvements de liquides sécrétés avec une rapidité plus ou moins grande. Des changements de température, qui ne nous sont exactement perceptibles que grâce aux Instruments thermométriques par lesquels ils sont transformés en mouvements véritables. Les sons qui se produisent sont des mouvements vibratoires dont on apprécie les caractères et le nombre d'après le timbre et la tonalité du son.

Que restera-t-il donc des phénomènes de la vie en dehors de la dynamique animale proprement dite ? Les actions chimiques ? Elles sont déjà revendiquées par les physiciens, qui les considèrent comme une véritable dynamique moléculaire. Il ne restera que les phénomènes

sensitifs et psychiques, que leur nature essentiellement subjective rend si difficiles à étudier sur autrui.

En somme, tout ce que, en physiologie, est exactement comparable et mesurable se rattache à la dynamique animale ; au mouvement fonctionnel.

L'étude d'une science, lorsqu'elle est suffisamment avancée, porte en elle-même un grand attrait. L'astronomie procure à l'esprit humain une des plus vives satisfactions qu'il puisse avoir : celle de contempler les lois exactes régissant les mouvements des astres dans les espaces infinis. L'organisme vivant n'est pas moins admirable à observer ; Platon l'appelait le microcosme, car il avait su y deviner un monde de merveilles condensées dans un petit espace. Pour nous, à l'attrait de l'étude, se joint le but d'utilité qui relève encore notre profession, et qui suffit à stimuler le zèle de ceux chez qui est moins développé le sens de l'admiration de la nature.

Mais, que de difficultés ne faut-il pas surmonter d'ordinaire, avant d'arriver au plaisir d'apercevoir une

vérité scientifique. Le choix de la méthode est d'autant plus important, que c'est de lui que dépendra la facilité où la difficulté de la tâche. Je viens, messieurs, exposer devant vous une méthode nouvelle qui, je l'espère, simplifiera beaucoup l'étude, que permettra d'en étendre le champ, et rendra plus claires les démonstrations. Un coup d'œil rapide sur les principales méthodes employées jusqu'ici est indispensable avant de commencer ; vous excuserez, j'espère, ce qu'il y a de banal dans un semblable exposé, en faveur des faits nouveaux qu'il me permettra de mettre en relief.

Tout progrès dans les sciences ne s'effectue que par l'emploi combiné de divers procédés qui sont comme de puissants leviers, au service de l'esprit humain. Nous voulons parler de l'analyse, qui constate et devine, et de la synthèse qui vérifie les phénomènes en les reproduisant. Bientôt un nouveau besoin se fait sentir, celui d'exprimer à autrui la vérité découverte, et de la perpétuer par l'écriture. Ces trois éléments du progrès : analyse, synthèse, expression, ont subi des transformations successives, se perfectionnant sans cesse,

et gagnant toujours en puissance, à mesure qu'ils se perfectionnaient. Suivons-les un instant dans cette voie d'amélioration incessante ; cela nous permettra de voir dans quel sens se sont réalisés les progrès, et dans quel sens par conséquent il faut en chercher de nouveaux.

L'analyse consiste à réduire à ses éléments les plus simples un phénomène trop complexe pour être saisissable. Si la multiplicité des actes simultanés offusque notre esprit, nous nous efforçons d'abstraire l'un de ces actes, nous l'observons de notre mieux, puis, passant à un autre, nous l'étudions de la même manière. Ainsi, vaincre successivement les obstacles qui se présentent, briser une à une les flèches dont le faisceau résistait à nos efforts, tel est le rôle de l'analyse, tel est la source de sa puissance. Mais, dans cette lutte de détails, des difficultés d'un autre ordre se présentent encore ; elles tiennent à l'insuffisance de nos sens, auxquels échappent les objets trop petits ou trop grands, trop rapprochés ou trop éloignées, les mouvements trop lents ou trop rapides. L'homme a su se créer des sens plus puissants pour atteindre la vérité qui le fuit ; il a rendu sa

vue plus perçante à l'aide du télescope qui sonde l'immensité de l'espace, et du microscope qui explore l'infiniment petit. La balance et le compas en main, il estime avec précision le poids et le volume des corps, ce que son toucher ne lui indiquait que d'une manière grossière. Plus une science a progressé, plus il lui a fallu d'instruments, car elle a dépassé les horizons qu'embrassaient les regards de nos devanciers . Elle a franchi les limites du cercle dans lequel s'est agité longtemps l'esprit humain, s'épuisant à contempler la superficie des mêmes objets, usant dans une dialectique stérile la puissance qu'il emploie aujourd'hui à des observations rigoureuses.

Les instruments sont les intermédiaires indispensables entre l'esprit et la matière ; le physicien, le chimiste, l'astronome, ne peuvent rien sans leur secours. L'anatomiste, le physiologiste, le médecin, ont aujourd'hui recours à l'emploi d'instruments, au grand profit de la science médicale. L'invention des injections cadavériques et celle du microscope, ont inauguré une ère nouvelle pour l'anatomie, qui doit à leur emploi, la

perfection qu'elle a atteinte de nos jours. La physiologie procède de même ; les manomètres, les thermomètres, des machines électriques variées, les appareils enregistreurs, etc., sont entre les mains de tous les physiologistes ; ils leur permettent de substituer l'expérimentation proprement dite à l'observation toujours plus lente, et souvent impuissante à découvrir les lois qui régissent la vie. Les médecins eux-mêmes recourent à chaque instant à l'emploi d'instruments. La chirurgie en fait un usage qui touche à l'abus, tant elle a multiplié le nombre et varié la forme de ses pinces, de ses bistouris et de ses ciseaux. Cette exagération d'une tendance bonne en elle-même a poussé bien des médecins à une réaction fâcheuse, Certains médecins trouvent qu'une trousse est déjà un arsenal bien lourd à porter ; ils voudraient la réduire encore. Je présentais un jour mon sphygmographe à l'un de ces praticiens ennemis de la nouveauté, et je faisais ressortir l'avantage qu'a cet instrument de reculer la limite de nos sens, en révélant à la vue ce qui échappe au toucher. Mon argumentation rencontra l'opposition la plus vive ; ce

respectable confrère déclara que, pour lui, c'était une mauvaise tendance que celle qui violentait la nature et voulait donner à nos sens plus de portée qu'ils n'en ont. En disant cela, mon interlocuteur fixait sur moi ses regards convaincus... à travers des lunettes.

Il faut, messieurs, n'avoir jamais été aux prises avec les difficultés de l'étude de la nature, pour n'avoir jamais senti et regretté l'impuissance de nos sens à saisir les détails d'une fonction physiologique. On doit donc s'efforcer d'y suppléer, à moins d'accepter comme définitif l'état actuel de la science, et de s'enrôler dans la nombreuse phalange des satisfaits. Il faut que chacun de nous cherche à réaliser par lui-même un progrès. On s'effraye en général de la difficulté qu'il y a à trouver quelque chose de nouveau ; on entend répéter à chaque instant ce proverbe décourageant : Il n'y a rien de neuf sous le soleil. Reste donc la tâche plus ingrate de contrôler des expériences déjà faites. Mais alors même, un autre argument vous arrête. Comment espérez-vous, au début de vos études, observer mieux que Haller, que Spallanzani, que Müller. Si vous confirmez ce que ces

maîtres ont observé, vous n'ajoutez rien à leur gloire. Si vous différez d'opinion avec eux, qui donc osera vous donner raison ? Découragé de tous côtés, attendez-vous pour faire des recherches anatomiques qu'il arrive entre vos mains quelque animal exotique encore inconnu en Europe, Guettez-vous les découvertes de la chimie pour essayer les propriétés physiologiques des nouveaux corps ?

Telle est pourtant la fâcheuse tendance de notre époque ; telle est la fausse idée qui arrête le zèle de bien des travailleurs. On s'imagine qu'il n'y a plus rien à trouver sur la route battue, ou tout au moins, que toutes les choses importantes y ont été observées ; dès lors on renonce à toute recherche ou bien on se perd dans de minutieux détails. Nos plus grands physiologistes ne pensent pas ainsi heureusement ; ils n'ont qu'à regarder devant eux pour trouver dès choses nouvelles, qu'on a vues cent fois avant eux sans les comprendre.

Oui, messieurs, un étudiant de nos jours peut répéter une expérience de Galien ; et il verra mieux que le médecin de Pergame, Car on sait mieux voir

aujourd'hui. Notre esprit, éclairé par la science acquise avant nous, se laisse moins facilement surprendre par l'erreur, Nous reprendrons des expériences de Spallanzani, de Haller, et de Magendie, et nous observerons mieux que Ces maîtres, parce que nous userons de moyens plus puissants. Que le niveau de l'esprit humain reste toujours le même, c'est possible, mais Ce qui se perfectionne, ce sont les moyens d'analyse, les procédés et les instruments. Leur emploi fait toute notre supériorité.

La synthèse est le contraire de l'analyse, elle reconstruit ce qui avait été décomposé ; Telle est la définition primitive de la synthèse, considérée comme opération de l'esprit. Mais, lorsqu'on applique cette méthode à l'étude de la nature, elle perd son caractère abstrait et en prend un tout nouveau, qui l'éloigne un peu de ce que l'avait faite la définition scolastique. Prenons des exemples. Lorsque le chimiste a décomposé l'eau par l'analyse, et qu'il en a séparé ses deux éléments, oxygène et hydrogène, s'il recombine de nouveau ces deux gaz, il fait ce qu'on appelle la synthèse de l'eau. Or, dans cette

seconde expérience, on trouve la plus satisfaisante démonstration de l'exactitude de la première. La synthèse a servi de contrôle à l'analyse. Nous assistons aujourd'hui à la constitution d'une science nouvelle : la chimie organique basée sur la synthèse. M. Berthelot, qui a attaché son nom à ce magnifique travail, a montré toute la fécondité de l'emploi de cette méthode.

La physique use de la synthèse encore plus largement.

Tout appareil de démonstration est l'assemblage synthétique de mécanismes destinés à produire un phénomène que l'analyse a fait prévoir. Si l'on veut bien nous permettre de définir ainsi la synthèse, dont la nature a été si controversée, on voit qu'elle nous offre surtout le moyen de confirmer et de démontrer ce que l'analyse avait découvert.

Or, en physiologie, la synthèse n'a trouvé sa place que fort tard, c'est dire que le contrôle manquait à la plupart des théories déduites de l'observation. Aussi, que d'hypothèses non vérifiées nous ont légué les anciens !

La certitude scientifique n'est venue que du jour où l'expérimentateur, plaçant l'organisme dans certaines conditions déterminées par l'analyse, a pu reproduire à coup sûr un phénomène. C'est donc à la synthèse bien plus qu'à l'analyse que se rattache la méthode expérimentale, car l'essence de l'expérimentation est de vérifier les prévisions, de confirmer les théories, et de fournir en même temps une démonstration de leur exactitude, en rassemblant les conditions d'existence des phénomènes. Il est enfin une application de la synthèse aux faits physiologiques, qui me paraît susceptible de réaliser de grands progrès. Elle consiste à reproduire, en dehors de l'être vivant, l'élément chimique ou physique d'un phénomène. Ainsi pour démontrer l'action que de l'air exerce sur le sang à travers les parois des cellules pulmonaires, on fait voir que du sang veineux peut être hématoxé par l'action de l'air à travers une membrane organique. Pour prouver l'influence des acides de l'estomac dans la digestion, on montre dans un matras que l'addition d'un acide à un mélange de suc gastrique et de viande provoque une digestion artificielle, qui ne

s'opérait que très incomplètement sans lui. Les phénomènes physiques ou mécaniques qui se passent chez l'animal vivant sont encore plus susceptibles de démonstration synthétique. On connaît l'ingénieux schème de Bernouilli et Hamberger, au moyen duquel on montre comment les intercostaux externes peuvent, en se raccourcissant, augmenter l'intervalle des côtes auxquels ils s'insèrent. Le schème de Weber sur la circulation parle plus aux yeux qu'une figure immobile, et nous espérons prouver plus tard que des schèmes perfectionnés peuvent reproduire d'une manière si parfaite les principaux phénomènes de la circulation, qu'ils constituent une démonstration péremptoire de leur nature intime. Les mouvements respiratoires, le rôle antagoniste des forces musculaires et de l'élasticité du poumon, la production de pressions variables dans la plèvre et dans les bronches, tout cela peut être reproduit par la synthèse avec grand profil pour la confirmation des théories et la clarté de la démonstration.

1 *Des différents modes d'expression et de transmission des unités découvertes.*

Je ne m'étendrais pas, messieurs, sur l'antique invention du langage pour exprimer la pensée, sur la découverte de l'écriture qui la fixe sur le papier et la transmet jusqu'aux générations futures, sur l'invention de l'imprimerie qui propage les idées et en assure la perpétuité en multipliant indéfiniment leur représentation écrite. Tous ces bienfaits de la civilisation nous sont acquis ; ils ne nous laissent qu'un regret, celui de ne pas voir s'établir une langue universelle permettant le libre échange de la pensée entre tous les peuples. Vous avez tous entendu formuler le regret de n'avoir même plus une langue scientifique. Le latin, qui serrait jadis aux savants de tous pays pour communiquer entre eux, n'est plus parlé nulle part ; on n'écrit plus en latin, et celui qui veut connaître ce qui se fait de nos jours en Europe est obligé d'apprendre les langues vivantes, c'est-à-dire de passer une grande partie de sa vie à des études préparatoires.

Cette langue universelle que nous appelons de tous nos vœux, elle existe pour la science, messieurs, ou du moins elle se forme, elle devra bientôt se répandre dans toutes les publications scientifiques. C'est du graphique que je veux vous parler. Aussi ancien que l'homme, le graphique comprend tous les signes de représentation naturelle des objets, de leur forme, de leurs changements d'état. Les ébauches de figures d'animaux que les hommes de l'âge de pierre gravaient sur des os aujourd'hui presque fossiles, les figures de géométrie que nous a léguées Archimède ; les tableaux et les fresques que nous admirons encore après vingt siècles, toutes ces représentations d'animaux, de formes géométriques, de scènes plus ou moins animées, sont des expressions tellement naturelles de ce qu'on voulait montrer, qu'elles ont gardé leur sens précis à travers les siècles, et qu'aujourd'hui le Français comme l'Allemand en saisissent le sens, tandis qu'ils ne sauraient déchiffrer une vieille charte écrite il y a quelques siècles dans leur langue maternelle. C'est que tout ce qui est conventionnel est variable et muable ; le langage et

l'écriture des différents pays se modifient avec le temps, tandis que la représentation graphique des objets est restée immuable parce qu'elle était naturelle.

Mais dira-t-on, nous comprenons très bien que le graphique exprime à la pensée la figure des corps, et même leur couleur ; nous savons que grâce à l'introduction des notions de la géométrie dans l'art, la perspective peut même offrir à notre esprit l'idée des distances des objets entre eux. Mais tout cela diffère de la nature par l'absence d'un élément de grande importance ; le mouvement, le changement d'état. Oui, direz-vous, nous voulons bien que l'anatomiste, que le botaniste, le zoologiste, usent du dessin ou même de l'art plastique pour nous donner la notion de la forme, de la couleur, des rapports des organes. Nous leur accordons le droit de figurer ce qu'ils' ont vu au microscope, et de nous donner une idée de ce que nous ne saurions voir de nos yeux. Nous admettons qu'un traité scientifique, illustré de figures, nous donne une notion des instruments dont le physicien dispose, des matras et des cornues dans lesquels le chimiste met en action les différents corps ;

mais le mouvement de l'être vivant, le changement d'état des corps que la chimie transforme, comment l'exprimera-t-on ? Ce n'est qu'en vertu d'une convention que le peintre nous donne, par les altitudes des personnages) une idée des mouvements qu'il a voulu leur attribuer. En regardant un tableau de bataille, nous savons ce que veut dire cette hache levée qui ne s'abaissera pas, cet arc tendu dont le trait ne partira jamais. Tous ces mouvements figurés par le graphique ne nous sont intelligibles que parce qu'ils nous sont déjà connus. Mais un dessin ne saurait éveiller dans notre esprit l'idée d'un acte que nous n'aurions jamais vu s'accomplir :

À ces objections, nous allons répondre par des exemples.

Lorsque Descartes imagina de représenter par des courbes l'état variable d'un phénomène, il posa les lois de la représentation graphique du mouvement, et créa une langue nouvelle dont les règles sont si simples, qu'elles n'empruntent presque rien à la convention. Voici ces règles en quelques mots :

Placez un carré de papier devant vous, et divisez-le en carrés plus petits par des lignes également distantes et qui, tirées parallèlement à ses bords, se couperont à angle droit ; les petits carrés obtenus seront répartis en séries linéaires, verticales et horizontales. Sur la ligne horizontale qui limite en bas cette sorte de damier, ligne qu'on appelle abscisse, numérotez de gauche à droite chacun des carrés d'une série horizontale. Tout ce qui se passera dans chaque minute successive du phénomène devra être noté dans la série verticale du carré situé au-dessus du numéro d'ordre correspondant, c'est-à-dire que ce qui se passe dans la première minute se notera dans la première colonne verticale, ou au-dessus du chiffre 1. de la ligne des abscisses. Ce qui se passera dans la deuxième, la sixième, la quinzième minute, se notera dans la deuxième, la sixième, la quinzième colonne verticale, au-dessus du numéro d'ordre correspondant de la ligne des abscisses. Comment exprimer à son tour le changement qui arrive à chaque minute dans l'intensité du phénomène observé ? Prenons sur le bord gauche du carré de papier la ligne verticale qui le limite, et notons-y

de bas en haut des numéros d'ordre pour chacun des carrés, qui est le premier d'une série horizontale ; la ligne qui porte cette notation se nomme ligne des ordonnées ; elle sert de repère pour noter l'intensité du phénomène observé. Nous avons désormais tous les éléments nécessaires pour tracer la courbe des phénomènes.

Supposons, pour fixer les idées, qu'il faille exprimer graphiquement le changement de température d'un corps qui s'échauffe et se refroidit alternativement. Si, à la première minute, sa température est de 15 degrés, nous marquons un point sur le quinzième carré compté de bas en haut sur la première colonne verticale, c'est-à-dire en face du numéro 15 des intensités et du numéro 1 des temps. À la deuxième minute, le corps s'est échauffé de 3 degrés ; on note sa température en face de la division 18 de la ligne des ordonnées, et de la division 2 de la ligne des abscisses. Le corps reste à la même température pendant les quatre minutes suivantes, on notera donc la persistance du même état par une série de points tous placés en regard du numéro 18 des ordonnées, mais échelonnés au-dessus des numéros 3, 4, 5, 6, des

abscisses. Ainsi de suite jusqu'à la fin de l'expérience. Si l'on joint l'un à l'autre, par une ligne, chacun des points successifs qu'on a tracés de gauche à droite, il résultera une ligne sinueuse ou courbe des températures qui exprimera, suivant qu'elle s'élève ou s'abaisse plus ou moins haut et plus ou moins brusquement, que la température s'est modifiée, s'élevant et s'abaissant elle-même, et accomplissant ces variations avec plus ou moins de rapidité.

C'est par le même procédé que, dans les statistiques, on représente sous forme de courbes l'élévation ou l'abaissement du chiffre de la population d'un pays ou d'une ville, et qu'on exprime simplement et clairement l'intensité des variations que cette population a subies, le temps pendant lequel elle s'est accrue, a diminué ou est restée stationnaire.

En médecine, on peut exprimer également par des courbes la proportion de succès et de revers dans les opérations, les changements que subit jour par jour le poids d'un malade, les variations de fréquence de son pouls ou de ses mouvements respiratoires.

Depuis longtemps il existe une expression graphique de mouvements très fugitifs, très délicats, très complexes, qu'aucun langage ne saurait exprimer. Cette admirable écriture se lit dans tous les pays ; c'est à proprement dire, une langue universelle. Je veux parler de la notation musicale. Permettez-moi de faire ressortir en quelques mots toute l'ingéniosité d'une pareille représentation des sons. Vous verrez, chemin faisant, qu'on peut beaucoup emprunter à cette méthode dont l'auteur, Guy d'Arezzo, avait, pour ainsi dire, pressenti la géométrie analytique.

Étalez devant vous une portée de musique ; vous y remarquerez des coupures verticales qui correspondent à des mesures, c'est-à-dire il des intervalles de temps égaux. Or, n'est-ce pas la même expression des durées que dans le cas précédent où la ligne des abscisses est coupée à intervalles égaux par des lignes, dont l'intervalle correspond aux secondes. – Subdivisons cette mesure, nous y voyons des notes, très pressées lorsqu'elles se succèdent à de courts intervalles, très espacées quand elles ont chacune une durée plus longue

ou quand elles sont séparées par des silences. N'est-ce pas toujours la même manière d'exprimer les durées. Chaque son n'est-il pas défini dans sa durée par l'espace horizontal qui lui est assigné. (Ici, toutefois, une objection se présente : pourquoi n'avoir pas poussé le raisonnement jusqu'à ses dernières conséquences, et n'avoir pas donné à chaque note la longueur horizontale qui correspond à sa durée ? Pourquoi n'avoir pas représenté les silences par la longueur même de portions de mesure où rien n'est écrit, on eût supprimé ainsi un grand nombre de signes : pause, demi-pause, soupir et ses divisions. On eût moins recouru à la convention et la notation musicale eût exprimé d'une manière plus naturelle les durées des sons et des silences. Probablement que les exigences de la mise en page qui forcent à condenser certaines mesures d'un morceau pour gagner de l'espace, et à ne pas respecter l'égalité de division de la ligne des temps, a fait donner aux notes, pour plus de netteté à l'œil, ces formes arrondies au lieu des antiques carrés du plain-chant, dont la longueur variable eût si bien pu exprimer les durées.)

Continuons : voici plusieurs sons qui doivent être simultanés et former un accord. Comment exprimer cette simultanéité ? En les superposant de façon que leur projection tombe sur le même point de la ligne des abscisses. La géométrie analytique ne procède pas autrement.

Mais la succession des sons et leur durée relative n'est qu'un élément de la musique ; c'est la mesure. Il faut aussi apprécier la tonalité de chacun de ces sons. Quoi de plus simple que 'de classer chaque' son d'après son altitude, en vertu de cette simple convention qu'un son dont les vibrations seront plus nombreuses sera plus élevé dans la série. Dès lors la hauteur verticale de la note sur la portée représentera l'élévation du son, absolument comme dans notre premier exemple elle représentait l'élévation de la température. On saisit bien ici que la hauteur des notes est ainsi projetée sur la ligne des ordonnées. Je ne crois pas qu'on ait jamais rien observé en physiologie d'aussi complexe, d'aussi fugace et d'aussi difficile à représenter que certaines phrases musicales. Aussi n'aurons-nous affaire qu'à des figures

beaucoup plus simples pour exprimer les phénomènes qui se passent dans l'organisme.

Jusqu'ici, nous avons supposé que l'observateur représentait graphiquement les variations d'un phénomène dont il avait noté toutes les phases à des intervalles égaux, ce qui suppose une grande somme de travail et d'attention pour ne pas commettre d'erreur. Mais voici qu'un immense progrès se réalise, et qu'on imagine des appareils qui suppriment l'intermédiaire de l'homme entre le phénomène et sa notation, appareils qui forcent, pour ainsi dire, la matière à écrire elle-même les changements d'état qu'elle subit.

MM. Poncelet et Morin imaginèrent ce célèbre appareil enregistreur, destiné à déterminer les lois de la chute des corps. Vous savez que, jusqu'à nos jours, on mesurait le mouvement des corps qui tombent en prenant une série de mesures successives, de façon à trouver l'espace parcouru en une seconde, en deux secondes, etc. Le plan incliné de Galilée et la machine d'Atwood exigeaient un long tâtonnement pour la détermination du mouvement accéléré des corps graves. Dans la machine

Poncelet et Morin, le corps pesant qui tombe porte une plume, et dans sa chute trace une ligne sur un cylindre couvert de papier, tournant autour d'un axe vertical avec une vitesse uniforme. Si l'on étale sur un plan le papier qui revêtait le cylindre, on y voit une courbe continue qui exprime d'une manière très simple la position du corps grave à tous les instants de la chute.

Cet appareil est le premier des enregistreurs ; il est basé sur le principe qui Préside il la construction de tous les autres instruments que j'aurai à décrire devant vous, et qui tous ont pour but de rendre non-seulement perceptibles, mais exactement mesurables des mouvements trop faibles, trop rapides, trop lents ou trop complexes pour être appréciés par nos sens.

2 Des appareils enregistreurs et de leur application en physiologie

Messieurs,

Je vais essayer d'esquisser en quelques lignes l'histoire de la méthode graphique appliquée à l'étude du mouvement en notant les progrès successifs qui l'ont faite ce qu'elle est aujourd'hui.

Il ne faut pas remonter bien loin pour trouver l'origine de la méthode graphique, ou du moins de ses applications concrètes. Car, si Descartes est l'inventeur de la représentation écrite d'un mouvement, c'est à Watt que l'on doit le premier instrument enregistreur qui ait traduit ce mouvement au moyen d'une courbe tracée par la machine elle-même ; Watt, en 1806, cherchait à connaître le rapport qui existe entre le mouvement du piston d'une machine et la pression de la vapeur qui le soulève. Pour cela, il fit tourner un cylindre vertical au

moyen d'une corde attachée au piston de la machine ; sur ce cylindre écrivait une plume mue verticalement par une sorte de manomètre à ressort connu sous le nom d'indicateur de Watt. On comprend dans ces conditions, la ligne des abscisses, c'est-à-dire des temps, était tracée par le mouvement essentiellement varié et alternatif du piston, et que la courbe obtenue donnait bien l'expression de la tension de la vapeur, relativement au mouvement du piston. Plus tard, un mécanicien allemand, voulut compter automatiquement les coups d'un bélier hydraulique pendant un temps donné. Il prit une bande de papier animée d'un mouvement de translation arbitraire sur laquelle il faisait pointer les coups de bélier. Notant l'heure du début et celle de la fin de l'expérience, il comptait le nombre de pointages dans ce temps, et de là concluait au nombre de coups de bélier par minute. Dans cette méthode, on n'avait aucune preuve de la régularité des coups de bélier hydraulique, puisque la vitesse de translation du papier était arbitraire.

C'est alors que doit se placer l'invention du général Poncelet, qui conçut le plan de la machine à

enregistrer la chute des graves. Un cylindre tournant d'un mouvement uniforme reçoit la trace d'un mouvement accéléré, Cette machine fut construite par le général Morin qui chercha à appliquer la même méthode à l'analyse de diverses espèces de mouvement. Le principe sur lequel elle est établie est celui d'après lequel on a construit, et l'on construira toutes les autres : c'est la comparaison d'un mouvement varié au mouvement uniforme. Plusieurs modifications de détail ont été apportées suivant le besoin, à la construction des enregistreurs : On s'est servi de surfaces planes au lieu de cylindre tournant. Des disques tournant ou des plaques traînées par un charriot dans un plan vertical ont servi à recevoir le tracé. Une surface plane présente un grand avantage dans le cas où la pointe écrivante est mue par un levier. En effet, dans ces conditions la pointe ne reste en contact avec le cylindre que si elle n'exécute que des mouvements très peu étendus, tandis que l'emploi d'une surface plane pour recevoir le tracé permet au levier ; d'enregistrer des mouvements d'une amplitude illimitée.

Un inconvénient très grand empêchait encore de

tirer de la méthode graphique tous les fruits possibles. C'est que l'uniformité absolue n'existe pas dans le mouvement de nos machines. Si une montre marque l'heure exactement, c'est-à-dire si elle se retrouve d'accord au bout de vingt-quatre heures avec le mouvement sidéral, cette précision apparente n'est que la confirmation d'une série d'avances et de retards. Le cylindre tournant n'est pas plus que les autres machines animé du mouvement uniforme absolu, de sorte que, dans l'appréciation d'un phénomène, si l'on veut diviser une seconde en fractions très petites, on peut commettre de graves erreurs.

Pour corriger cette irrégularité du mouvement, ou plutôt pour la signaler lorsqu'elle existe, Wertheim eut l'heureuse idée d'enregistrer sur le disque tournant qu'il employait les vibrations d'un diapason. Connaissant combien de fois un diapason vibre par chaque seconde, il devenait facile de déterminer sur un tracé la durée exacte d'une seconde, d'un dixième, d'un centième, d'un millième même de seconde, il suffisait pour cela de compter le nombre de vibrations enregistrées dans une

longueur quelconque, pour déterminer la valeur de cette longueur transformée en temps.

M. Duhamel donna une grande impulsion à cette méthode nouvelle de mesurer le temps ; le succès fut si complet qu'il permet aujourd'hui de mesurer la vitesse d'un projectile d'arme à feu avec une approximation qui irait, au besoin, à un vingt-millième de seconde.

Enfin, tout récemment, M. Foucault vient de résoudre d'une manière satisfaisante la difficulté qu'on n'avait encore qu'évité, il vient de construire un régulateur qui permet de donner à une machine quelconque le mouvement uni forme. Un appareil de ce genre aurait marché d'accord avec un pendule astronomique pendant trois heures, avec un écart de un vingtième de seconde seulement. On voit qu'il n'existe aucune expérience où une pareille précision ne soit pas suffisante.

Les physiologistes ont compris des premiers toute l'importance qu'avaient de pareils instruments, aussi en ont-ils fait des applications nombreuses et qui chaque

jour s'étendent davantage. Nous aurons à décrire en leur temps ces différents appareils, dont les premiers sont le kymographion de Ludwig, employé depuis par Volkmann et le myographion de Helmholtz. Puis vinrent le sphygmographe de Voerendt le nôtre avec le cardiographe et le thermographe, etc, Les noms de ces appareils indiquent leur destination.

Pour étudier fructueusement les différents appareils construits jusqu'ici par les physiologistes, pour pouvoir juger la valeur de chacun d'eux, ainsi que le degré de confiance qu'on doit leur accorder, nous devons tout d'abord rechercher les causes d'erreur qui peuvent se présenter dans leur construction. Elles peuvent porter sur presque tous les éléments des appareils dont on se sert : sur l'enregistreur, sur les pièces qui tracent la courbe, et sur les divers organes qui transmettent le mouvement du point où il se produit à la plume qui l'enregistre.

L'enregistreur parfait est celui qui se meut d'une vitesse absolument uniforme, or, nous avons dit que cet appareil idéal pourra être réalisé au moyen du régulateur de Foucault. En attendant, il faut rendre les moins

irréguliers qu'il soit possible les moteurs dont nous disposons, D'après les figures publiées par les physiologistes allemands, on voit que ces auteurs se sont servis assez souvent du pendule circulaire de Huygens, et qu'ils évitaient ainsi dans le mouvement de leur cylindre les petites oscillations de l'échappement des pendules ordinaires. D'autres fois, ils se sont servis de volants dont les ailes s'ouvraient ou se fermaient à volonté, éprouvant ainsi une résistance variable de la part de l'air ou de l'eau dans laquelle ils se mouvaient. Ces variations dans la vitesse sont indispensables pour un enregistreur qui doit servir à différents usages ; en effet, on rencontre dans les fonctions de la vie des mouvements de toutes sortes, tantôt très rapides, tantôt très lents.

Un enregistreur à mouvements extrêmement lents n'est pas moins précieux qu'un appareil à mouvements rapides, car ce n'est pas seulement l'extrême rapidité d'un mouvement qui fait qu'il nous échappe. C'est non moins souvent son extrême lenteur ; la marche de l'aiguille d'une montre échappe à nos yeux, Nous ne rayons pas davantage un animal augmenter de volume,

une partie du corps se gonfler ou se resserrer par les variations lentes de la circulation interstitielle. Ce qui nous frappe, dans ces derniers cas, c'est le changement d'état constaté dans deux observations éloignées, mais nous ne percevons pas les phases diverses, plus ou moins lentes ou rapides de ces changements d'état. Il y aura grand intérêt à étudier au moyen de semblables appareils les phénomènes à variations lentes ; l'accroissement, les différentes pertes de poids du corps par la transpiration ou l'exhalation pulmonaire, sous l'influence de diverses températures et dans des milieux variables. un grand nombre de phénomènes, qui nous échappent presque entièrement, pourraient ainsi être appréciés. Aujourd'hui, la tendance est à l'analyse des mouvements rapides, les imaginations ont été vivement impressionnées par les découvertes de Helmholtz qui mesura la vitesse du courant nerveux. Les sciences physiques nous ont donné de bien plus grands sujets d'étonnement, en nous montrant que l'on peut mesurer le temps qu'un boulet de canon met à parcourir l'espace d'un mètre ou que la lumière emploie à parcourir un kilomètre. Les

phénomènes de la physiologie dont nos sens nous ont révélé l'existence se passent dans des limites de temps moyennes entre ces extrêmes. Un enregistreur dont la vitesse est d'un centimètre à la seconde suffit dans bien des circonstances ; ainsi dans les expériences faites sur les battements du cœur, sur ceux du pouls et sur les mouvements respiratoires. Cette vitesse, si elle était généralement adoptée pour la plupart des expériences, aurait cet avantage qu'elle établirait une sorte d'unité dans les recherches des physiologistes de différents pays. On est souvent dérouté lorsqu'on voit qu'une courbe que l'on a obtenue avec un appareil d'une certaine vitesse est représentée par un autre physiologiste avec une vitesse toute différente. La déformation qui se produit alors n'a, du reste, aucune valeur absolue ; elle ne doit en rien altérer le premier des mouvements, mais le représente seulement sur une échelle plus ou moins étendue. Dans bien des circonstances, il faut tâtonner et chercher la meilleure vitesse qu'on puisse employer. Lorsqu'un tracé est très riche en détails, il risque d'être confus si la machine tourne lentement, il faut alors accélérer le

mouvement jusqu'à ce que tous les détails deviennent bien distincts les uns des autres.

D'une façon générale, lorsqu'on doit enregistrer une courbe, il est bon de chercher une vitesse de l'enregistreur telle qu'il n'y ait dans le tracé ni ligne verticale absolue, ni ligne horizontale. Le premier cas est dû à ce que le cylindre tourne trop lentement, de sorte que le mouvement enregistré est infiniment rapide par rapport à celui du cylindre. Le second cas se produit lorsqu'un mouvement lent s'enregistre sur un cylindre qui tourne avec une excessive rapidité. La ligne sensiblement horizontale obtenue dans ce dernier cas, signifie que par rapport à la rotation du cylindre le mouvement enregistreur est infiniment lent.

Après de nombreux tâtonnements, voici la disposition que j'ai adoptée dans la construction de mon enregistreur. Cet appareil permet d'obtenir à volonté : des tracés de longue durée inscrits à l'encre sur une bande de papier de 5 ou 6 mètres de long ; des tracés de courbe obtenus sur des plaques de verre traînées dans un plan vertical par un petit chemin de fer. Enfin mon appareil

fournit dans certains cas des tracés dans lesquels les phénomènes les plus rapides sont facilement mesurables ; je les obtiens sur un disque qui tourne avec une grande rapidité sur l'axe même du volant et qui exécute de quinze à vingt tours par seconde au besoin.

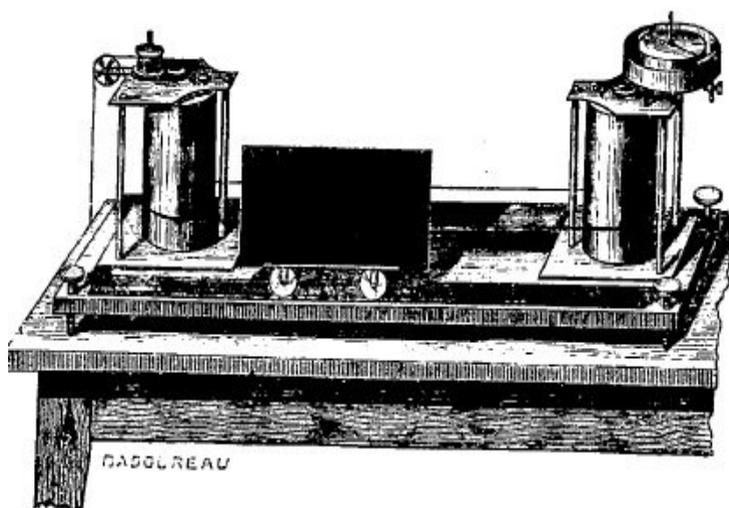


FIG. 52. — Appareil enregistreur de M. Marey.

La figure 52 représente l'enregistreur dont je viens de parler. À gauche est un cylindre fixé sur une planche horizontale et soumis à la traction d'un poids. Ce cylindre tournerait ainsi follement sur son axe si le poids agissait sur lui seul, mais un câble sans fin le relie à un autre cylindre situé à droite de la planche et qui ne peut

tourner qu'en entraînant avec lui un mouvement. d'horlogerie que termine un volant. Ce dernier constitue une résistance et règle ainsi la vitesse de rotation des deux cylindres rendus solidaires par le câble sans fin. Quant à la disposition du volant, elle est telle que le mouvement puisse varier en vitesse de 1 à 200 ou 300, et même davantage. Le volant à deux ailes qui tourne dans une gorge circulaire ménagée dans le tambour cylindrique représenté dans la figure. Ces ailes s'ouvrent ou se ferment à volonté et rencontrent par conséquent des résistances variables. La gorge dans laquelle ces ailes se meuvent peut être plus ou moins remplie d'eau et fournir ainsi une nouvelle série de vitesses moindres que la précédente, et pouvant se graduer jusqu'à une lenteur extrême, surtout si l'on remplace l'eau par un liquide visqueux.

Voilà donc le mouvement produit dans les deux cylindres avec la vitesse que l'on veut obtenir. La corde sans fin qui transmet le mouvement du premier cylindre au second sert à mettre en mouvement une plaque de verre enfumé portée sur un petit charriot qui roule sur un

chemin de fer en avant des deux cylindres ; à cet effet, une pince en forme de fourchette existe derrière le chariot et reçoit la corde sans fin qui glisse sans frottement entre les deux branches de la fourchette sans entraîner le chariot.

Au moment où l'on veut que le chariot se meuve, une bascule pesante, que l'on fait tomber au-dessus de la fourchette, enfonce la corde dans son encoche, et le chariot ; devenu adhérent à la corde, suit son mouvement ; si l'on relève la bascule, la corde redevient libre et le chariot s'arrête. Cette disposition permet d'obtenir, presque instantanément, le mouvement de la plaque de verre ou son arrêt, sans que la machine cesse de fonctionner.

Si l'on veut enregistrer une expérience de longue durée, on enlève le chariot et la corde sans fin, on dévisse un écrou qui fixait en place le cylindre qui porte le volant et l'on fait marcher ce cylindre de droite à gauche dans une glissière disposée à cet usage, jusqu'à ce qu'on l'ait amené au contact du cylindre de gauche, où on le fixe en resserrant l'écrou. On colle alors l'extrémité d'une bande

de papier sur le cylindre de droite et on l'enroule sur celui-ci, puis on colle l'extrémité de celle bande sur le cylindre de gauche. Dans ces conditions, la bande de papier, tirée par le cylindre de gauche que le poids met en mouvement, s'enroulera sur lui et se déroulera du cylindre qui tient au volant. Cette feuille sera l'organe de la transmission du mouvement d'un cylindre à l'autre, et, par conséquent, sera toujours régulièrement tendue. La rapidité du mouvement de celle bande de papier se réglera, comme celle du chariot, au moyen du volant.

Enfin, pour les expériences qui doivent s'enregistrer avec un mouvement très rapide, je me sers d'un disque tournant monté sur l'axe prolongé du volant lui-même. Ce disque de verre enfumé reproduit les conditions des expériences de Wertheim. Valentin s'en est servi avec succès pour l'étude des formes de la contraction musculaire. Il permet d'obtenir facilement des mouvements qui correspondraient à une vitesse linéaire de 3 ou 4 m/s, Comme, d'autre part, on peut obtenir avec le chariot une vitesse minimum de 1 millimètre par seconde, on voit que la série des vitesses

possibles avec cet appareil s'échelonne entre un et trois ou quatre mille. Dans toutes ces conditions, il est utile de déterminer quelle est la vitesse de translation des surfaces sur les quelles on enregistre un mouvement. Pour cela, je me sers ordinairement d'un pendule qui bat les secondes et les enregistre sur le papier ou la plaque de verre, au moyen d'un levier de cardiographe ordinaire. Pour les mouvements très rapides ou pour les mesures de très faibles durées, j'emploie la méthode de Wertheim, c'est-à-dire j'enregistre les vibrations d'un diapason bien réglé par la méthode optique de M. Lissajoux. On peut, par ce moyen, déterminer très facilement, avec certitude, des durées moindres qu'un millième de seconde.

Des appareils qui tracent le mouvement. – On a souvent à enregistrer des mouvements assez forts pour qu'ils puissent, sans s'altérer, supporter la résistance de frottement d'une plume sur du papier glacé. Alors le tracé s'écrit avec l'encre ordinaire, c'est la manière la plus simple. Ce moyen peut être employé pour les mouvements respiratoires, pour ceux du pouls et même pour ceux du cœur quand ils sont bien prononcés. Il faut,

toutefois, que la plume exerce le moins de pression possible sur le papier sans toutefois cesser d'être en contact avec lui. Pour cela, je place cette plume au bout d'un mince ressort, qui se courbe légèrement par le contact de la plume avec le papier, mais dont l'extrême élasticité n'exerce contre celui-ci qu'une pression très faible et très régulière.

Si l'on écrit sur le verre enfumé, le même ressort, taillé à son extrémité en pointe sèche, peut être employé. On peut avantageusement remplacer ce ressort d'acier par une lame de baleine effilée en pointe et râpée avec du verre jusqu'à ce qu'elle soit amincie au point de devenir diaphane. Cette pointe réunit, comme le ressort, l'extrême flexibilité dans le sens de son épaisseur et la rigidité complète dans celui de sa largeur, c'est-à-dire dans le sens vertical.

La même pointe sert à écrire sur une feuille de papier en fumée et tendue sur la glace que traîne le chariot.

Pour fixer les tracés au noir de fumée, s'ils sont

sur papier, on trempe celui-ci dans l'essence de térébenthine, et lorsqu'il est sec, le noir est fixé suffisamment. Le même procédé peut être employé pour les tracés reçus sur une plaque de verre enfumé, à moins qu'on ne préfère employer ceux-ci comme clichés photographiques, ce qui permet de tirer un tracé à plusieurs exemplaires.

Il existe, m'a-t-on dit, d'autres moyens encore : ainsi le transport d'un tracé de noir de fumée sur papier gélatine, mais je n'ai pas vu employer ce procédé, et je n'ai pu réussir à obtenir ainsi de bonnes épreuves.

Des appareils qui amplifient et transmettent le mouvement. Entre la plume qui écrit et l'organe qui se meut, il faut nécessairement des appareils intermédiaires dont la forme variera avec le besoin, et qui, s'ils ne sont pas bien construits, peuvent modifier la forme du mouvement. On prouve facilement ce fait en inscrivant le même mouvement au moyen de deux appareils différemment construits ; soit le battement d'une artère qu'il s'agisse d'enregistrer, on pourra se servir du manomètre enregistreur, du sphygmographe de Vierordt

ou de mon sphygmographe. Dans ces trois cas, on aura trois tracés différents. Cela prouve déjà que deux au moins de ces appareils ont altéré le mouvement. J'espère vous prouver, plus tard, que le troisième n'est pas passible du même reproche.

Il est facile de démontrer que le manomètre n'obéit pas fidèlement au mouvement qui lui est imprimé. Il suffit de souffler dans cet appareil et d'élever ainsi l'une des colonnes de mercure à un certain niveau au-dessus de l'autre. Lorsqu'on cesse de souffler, le niveau devrait se rétablir dans les deux colonnes, puisque la pression atmosphérique agit également sur les deux branches. Or, vous savez qu'il n'en est rien, et que le niveau ne s'établit dans les deux branches de l'appareil qu'après des oscillations nombreuses qui sont propres à l'instrument. Ce défaut du manomètre est inhérent à l'emploi d'une colonne de mercure, et doit faire rejeter d'une manière absolue l'emploi du mercure dans les expériences graphiques. Le manomètre est un excellent instrument, si on lui demande d'indiquer l'intensité d'une pression fixe, positive ou négative ; il cesse d'être bon

s'il doit signaler des états variables.

Passons au sphygmographe de Vierordt ; cet appareil est composé de leviers équilibrés par des contrepoids, il se comporte à la manière d'une balance dont l'un des plateaux serait agité par un moteur quelconque, et dont l'autre répéterait le mouvement du premier. Or, une balance est-elle capable d'obéir fidèlement à la force motrice qui la sollicite. Vous pouvez vous convaincre facilement du contraire : chargez de 1 kilogramme chacun des deux plateaux, et laissez tomber dans l'un d'eux un poids de 1 gramme. Le plateau surchargé va-t-il tomber avec le poids qu'il reçoit et partager son mouvement rapide. Non, sans doute, vous savez qu'il descendra lentement, et que son mouvement sera d'autant plus lent, que le poids ajouté représentera une moindre fraction de la masse en équilibre. Le sphygmographe de Vierordt, instrument pondéré, semblable à la balance, présente comme elle l'inconvénient d'obéir avec lenteur aux impulsions qu'il reçoit, et par conséquent d'en changer la forme en vertu de son inertie.

J'ai cherché à éviter ces deux inconvénients, en

construisant mon sphymographe. Ce n'est pas le moment de donner une description de cet appareil que j'aurai l'occasion de vous montrer plus tard.

En résumé, entre l'organe qui se meut et la pointe qui écrit le mouvement, il faut une pièce intermédiaire. La plus facile à employer et la plus avantageuse, c'est le levier. Celui-ci en effet ; amplifie ou réduit le mouvement suivant le besoin. Quant à la manière d'éviter les inconvénients des appareils qui déforment le mouvement en vertu de leur masse, le remède le plus naturel est de diminuer cette masse elle-même le plus possible. Pour cela, on fait ce levier d'une substance très légère, amincie transversalement, afin qu'elle ait, dans le sens vertical, une résistance aussi forte que possible tout en étant très légère. On comprend que ce levier n'a plus de tendance à déformer le mouvement qu'il reçoit, d'autant plus qu'on exerce sur lui la pression constante d'un petit ressort qui assure son contact permanent avec l'organe qui fournit le mouvement exploré.

Enfin, le levier présente un léger inconvénient, celui de tracer un arc de cercle lorsqu'il s'élève ou

s'abaisse par un mouvement vertical, ce qui fait que les courbes obtenues appartiennent au système des coordonnées polaires, et non au système orthogonal que nous avons décrit précédemment. Ces deux systèmes sont réductibles l'un dans l'autre par la géométrie analytique ; mais, pour éviter ces pénibles transformations, il vaut mieux donner au levier beaucoup de longueur, et ne pas chercher à donner au tracé une grande amplitude ; de celle manière, le court axe du cercle tracé par un long levier peut, sans erreur sensible, être considéré comme une ligne droite. Le seul inconvénient, c'est de donner moins de netteté au tracé, par suite de l'extrême petitesse des courbes obtenues. On y remédie en donnant à la pointe ou à la plume écrivante une extrême finesse et en grandissant optiquement le tracé, ce qui n'altère pas ses proportions ; on peut donc examiner avec une petite loupe un tracé très fin et très petit, ou si ce tracé est recueilli sur un verre enfumé, le projeter sur un écran au moyen du mégascope qui l'amplifie autant qu'on veut, et permet de le décalquer avec les dimensions désirées.

Transmission à distance du mouvement obtenu. –

Souvent il est indispensable de pouvoir faire agir sur un ou plusieurs leviers établis les uns au-dessus des autres, des mouvements émanés de points différents et souvent éloignés. Pour cela, un excellent moyen de transmission consiste dans l'emploi de tubes pleins d'air, terminés aux deux extrémités par des entonnoirs que ferment des membranes élastiques. C'est le procédé imaginé par Buisson, et qu'avait déjà employé dans des conditions analogues le docteur Upham de Boston. Cette transmission m'a servi dans les expériences de cardiographie et dans différentes recherches sur l'action musculaire.

Enfin, étant donné un tracé enregistré par l'appareil, il est important de trouver des procédés pour le reproduire sans l'altérer dans les publications diverses. – Dans ces cas, la photographie peut rendre de très grands services, surtout lorsqu'elle permet de graver les figures photographiques sur plaques métalliques sans l'intervention du burin.

Une des grandes difficultés de la méthode graphique tient à l'extrême faiblesse de mouvements

qu'on a quelquefois à enregistrer. Ainsi, en thermographie, on verra que mon appareil, placé dans des conditions d'équilibre constamment variables, ne développe pas de force motrice suffisante même pour tracer des courbes sur du verre enfumé. Dans ces conditions, la plume ne doit plus frotter sur le verre, mais elle doit osciller perpendiculairement au plan de celui-ci, de manière à donner des pointages à ses différentes positions successives. Comme ces pointages sont très rapprochés les uns des autres, ils constituent dans leur ensemble une ligne continue.

Un autre cas se présente, c'est celui où non-seulement la force motrice est très minime, mais où les mouvements constituent des vibrations qui se succèdent avec une très grande rapidité. Dès que le nombre des vibrations qui doit être enregistré en une seconde dépasse trente ou quarante, l'inertie du levier se fait sentir, quelque légèreté qu'on ait essayé de donner à celui-ci. Une nouvelle ressource reste encore, c'est d'étudier les vibrations par la méthode optique de Kœnig, c'est-à-dire au moyen des flammes vibrantes dont l'image se réfléchit

dans un miroir tournant. Cette intéressante expérience sera exposée plus tard. J'indiquerai les services qu'elle peut rendre à la physiologie.

Enfin, M. Onimus a institué d'ingénieuses recherches dans lesquelles il a obtenu l'image photographique d'un mouvement rythmé. Ainsi, dans des battements de cœur des petits animaux, l'organe se contractant et se relâchant tour à tour passe par deux positions extrêmes, l'une de distension, l'autre de resserrement ; il revient sans cesse de l'une de ces positions à l'autre, s'arrêtant plus longtemps à chacune d'elles que dans les positions intermédiaires. Il suit de là, que l'image photographique d'un cœur qui se contracte donne assez nettement les contours superposés de l'organe en relâchement et en contraction, et permet de mesurer assez exactement la différence de forme et de volume du cœur dans ces deux conditions

Vous voyez, messieurs ; que nous sommes en mesure d'étudier, avec une rigueur jusqu'ici inconnue, ce phénomène essentiellement fugitif du mouvement fonctionnel, et cela quelque faible qu'il puisse être,

quelque grande que soit sa rapidité. Voici un point établi : c'est que l'insuffisance de nos sens est suppléée par la puissance des appareils enregistreurs, et qu'on pourrait appeler ceux-ci des microscopes du mouvement, puisqu'ils nous font percevoir des mouvements infiniment petits, infiniment lents ou rapides, tels enfin qu'ils échappent à nos sens d'une manière à peu près complète.

1 *Origine du mouvement fonctionnel.*

La plupart des fonctions s'accompagnent, vous le savez, de mouvements plus ou moins apparents. Ces mouvements, que les physiologistes et les médecins de l'antiquité attribuaient à des causes souvent mystérieuses, ou, que plus souvent encore, ils croyaient expliquer par une propriété spéciale de l'organe qui les présentait, sont aujourd'hui mieux connus dans leur cause. On sait, en effet, que presque tous sont engendrés plus ou moins

directement par le raccourcissement ou l'allongement d'un tissu spécial que l'on nomme tissu contractile ou musculaire.

Le raccourcissement d'un muscle et son relâchement sont par eux-mêmes des mouvements parfaitement appréciables, mais ils deviennent à leur tour causes de mouvements secondaires qui servent à l'accomplissement d'une fonction. Ainsi la locomotion, qui transporte l'individu d'un point à un autre, emprunte à la contraction musculaire la force qui produit les flexions et extensions successives des leviers osseux, les glissements des surfaces articulaires, en un mot tout le mécanisme de la marche. La respiration, qui à chaque instant apporte l'air dans les poumons et l'en expulse, n'atteint ce résultat qu'à l'aide de certains muscles, La circulation a pour premier moteur un muscle, le cœur, et pour régulateur à la périphérie du corps, les muscles vasculaires. Les battements des artères, que les anciens croyaient expliquer par une vertu pulsifique de ces vaisseaux, sont aujourd'hui réellement expliqués comme effets secondaires de la contraction du cœur. Les

congestions ou les anémies qui se produisent dans certains organes sont des effets de la contraction ou du relâchement des muscles vasculaires.

Il est donc naturel, dans une étude de la physiologie du mouvement, de commencer par examiner la manière dont se comporte l'appareil moteur ; de voir quelle est la nature du mouvement primitif qui s'y produit, afin de saisir comment et sous quelles influences ce mouvement se transforme ou se transmet pour devenir ce que nous le voyons en définitive, quand nous observons les fonctions de l'être vivant.

Aujourd'hui la terminologie est bien fixée relativement à la propriété qui nous occupe. La contractilité consiste dans le pouvoir spécial que possèdent les tissus vivants de modifier leurs formes, tandis que le nom d'élasticité est réservé à la propriété physique que possède un tissu quelconque organisé ou non de revenir à sa forme lorsqu'on la lui a fait perdre par une pression ou une traction quelconque.

Malgré les efforts des anatomistes et des

physiologistes, on n'a pu jusqu'ici ramener à un élément unique l'origine du mouvement. L'observation microscopique nous montre la contraction dans des tissus amorphes et dans des tissus organisés. Les animaux inférieurs, les méduses, par exemple, sont éminemment contractiles, sans qu'on découvre en elles le tissu spécial, qui est le siège de la contraction chez les animaux plus perfectionnés. Les amibes nous montrent la matière contractile sous son apparence la plus singulière, car il n'existe pour cette matière aucune forme déterminée ; on la voit dans le champ du microscope prendre spontanément les formes les plus bizarres, sans qu'on puisse saisir d'où lui vient ce mouvement.

Les cils vibratiles de certaine, cellules épithéliales présentent une organisation plus avancée ; mais, dans leur tissu diaphane, on ne voit encore rien qui par sa forme explique la production du mouvement qui les anime. On en peut dire autant des spermatozoïdes.

Cependant il existe des conditions physiques ou chimiques qui agissent de la même manière sur tout ce qui est contractile. Ainsi, la chaleur augmente la

contractilité, le froid la diminue. L'action des alcalis la favorise, celle des acides la détruit. Aussi, malgré l'impuissance des histologistes à ramener le tissu contractile à un élément unique, est-il permis d'admettre qu'une même substance sous des aspects divers est douée de la contractilité.

Pour mieux comprendre les conditions dans lesquelles se produit cette force motrice qu'on appelle contraction, il faut l'étudier dans les tissus où elle est la plus développée, c'est-à-dire dans les diverses espèces de tissus musculaires.

Le microscope nous a révélé deux formes principales de l'élément contractile ou musculaire : la fibre striée, appartenant aux muscles de la vie animale, et la fibre lisse, qui constitue les muscles de la vie organique. – Ces deux espèces de muscles présentent des différences physiologiques aussi tranchées que leurs caractères histologiques eux-mêmes. Le muscle strié, lorsqu'on excite le nerf qui l'anime, paraît se contracter avec une extrême rapidité et se relâcher aussitôt ; le muscle lisse se contracte tardivement, lentement et d'une

façon prolongée. On rattache aux muscles de la vie organique ou à fibre lisse un grand nombre de tissus contractiles, d'apparences variées, mais qui tous renferment les cellules caractéristiques des muscles lisses, et de plus partagent leur propriété de se contracter lentement et d'une façon prolongée, tels sont les muscles des vaisseaux et de la plupart des viscères, qui possèdent à un degré plus ou moins manifeste la contractilité.

Cette distinction, établie sur la nature des fibres qui constituent un muscle et sur le mode de contraction de celui-ci, est très naturelle ; cependant elle n'établit pas un caractère tranché d'une manière absolue ; certains muscles possèdent des fibres des deux ordres. Ainsi, le cœur, surtout constitué par des fibres striées, renferme pourtant aussi des fibres lisses. L'œsophage est dans le même cas. À cette structure mixte se rattache une fonction mixte elle-même, c'est-à-dire un mode de contraction qui offre un peu de la soudaineté de la contraction de la vie animale, et un peu de la persistance des contractions de la vie organique.

2 *Contraction des muscles à fibres striées*

C'est dans cet ordre de muscles que les physiologistes ont le mieux étudié le phénomène de la contraction, aussi commencerai-je par exposer les principaux faits découverts à ce sujet.

L'appareil, moteur se compose du nerf qui transmet une excitation et du muscle qui se contracte sous l'influence nerveuse. En dehors des actions volontaires qui se transmettent à travers les nerfs moteurs, il y a deux manières de faire contracter un muscle. La première consiste à irriter le nerf qui l'anime, soit par des agents chimiques, soit par l'électricité, le pincement, etc. La seconde est d'agir directement sur le muscle et de porter sur lui des agents de même nature que ceux qui ont servi pour l'irritation du nerf. De là on peut conclure que le nerf moteur possède une excitabilité en vertu de laquelle il agit sur le muscle, et que celui-ci est doué de contractilité indépendamment de toute action

nerveuse. Telle est l'opinion des physiologistes modernes, opinion déjà émise par Haller, mais qui était restée sans preuve suffisante, jus qu'au moment où M. Claude Bernard prouva l'exactitude de cette distinction, en montrant que le curare arrête toute influence du nerf sur le muscle, tout en laissant intacte la contractilité musculaire.

Dans les expériences physiologiques, quand on fait agir l'électricité sur les nerfs ou sur les muscles, on remarque ordinairement que la contraction obtenue diffère notablement de celle que l'on observe dans les conditions de l'acte musculaire normal. Une décharge d'électricité statique, l'ouverture ou la rupture d'un courant voltaïque ou même du courant propre des muscles de la grenouille, les irritations mécaniques, etc., produisent dans le muscle une secousse brusque et violente qui ne ressemble en rien aux mouvements gradués et durables que provoque la volonté. En effet, tout semble aujourd'hui prouver qu'une contraction véritable se compose d'une série plus ou moins prolongée de ces convulsions ou secousses que produit

une excitation isolée ; celles-ci sont à la contraction ce qu'une seule oscillation d'une corde tendue est au son proprement dit. Ainsi, de même qu'un son exige pour se produire une série de vibrations d'une certaine fréquence, de même aussi la contraction prolongée est constituée par une série de secousses.

Deux voies différentes ont conduit les physiologistes à cette opinion, qui semble aujourd'hui bien démontrée. D'une part, l'analyse du son produit par les muscles qui se contractent a fait conclure que la contraction s'accompagne de vibrations ou de secousses fréquentes du tissu musculaire. D'autre part, l'expérimentation synthétique a prouvé à d'autres physiologistes que si l'on provoque dans un muscle une série de secousses assez fréquentes, ces muscles paraissent être dans un état de contraction permanent analogue au tétanos.

A. Études analytiques du bruit musculaire – En 1809, le docteur Wollaston s'occupa des sons qu'on perçoit en auscultant un muscle en contraction. Dans le son qui se produit dans ces circonstances, et que nos

traités d'auscultation se bornent à signaler sous le nom de bruit musculaire, ou bruit rotatoire, Wollaston sut reconnaître une tonalité, et compara le son musculaire à celui que produit, pendant la nuit, le roulement des voitures de Londres.

Haughton reprit ces recherches et reconnut que certains bruits qui se passaient dans ses oreilles, et qu'il attribuait à la contraction du masséter, présentaient un timbre qu'il rapporte à celui de 32 à 35.

Or, en rapprochant ces évaluations, on trouve une concordance assez frappante ; c'est que tous les observateurs attribuent au bruit de contraction musculaire une tonalité qui suppose un nombre de 32 à 35 vibrations par seconde, – Le docteur Collongue, qui s'est occupé des mêmes recherches, a trouvé la même tonalité dans les muscles en contraction, et en soumettant sa remarque à notre habile acousticien Koenig, il a fait déterminer, avec le diapason, la tonalité du son perçu. Or, le diapason qui vibrait à l'unisson du muscle exécutait 32 vibrations par seconde. Nous ne suivrons pas le docteur Collongue dans ses appréciations de la signification du bruit ainsi perçu,

bruit auquel il attribue une grande valeur dans le diagnostic des maladies. Il semble donc bien établi que la contraction normale se compose d'environ 32 à 35 secousses musculaires par seconde. J'ai moi-même, après tant d'autres, constaté que telle est en effet la tonalité de mes muscles. Ceux-ci m'ont donné tantôt le si, tantôt le do de l'octave inférieur d'un piano. Tout le monde peut vérifier cette expérience, qui présente une légère difficulté, celle de bien percevoir la tonalité des sons graves.

B. Production synthétique de la contraction permanente au moyen d'excitations successives. – À côté des recherches analytiques dont nous venons de parler, d'autres expérimentateurs, employant la méthode synthétique, démontraient qu'une série de secousses assez fréquentes donnait lieu à la contraction musculaire permanente, ou tétanos. Heidenhain (1848) employa les excitations traumatiques. Il se servit d'un petit marteau qu'une roue dentée faisait mouvoir et qui frappait sur un nerf des coups répétés d'une certaine fréquence. Il vit qu'en donnant à l'appareil une rotation assez rapide, il

obtenait, non plus une série de secousses isolées, mais une contraction permanente. – En 1861, Rood obtint une contraction des muscles de l'avant-bras en tenant dans la main un cylindre qui tournait excentriquement autour de son axe avec une grande rapidité. Enfin Helmholtz, après avoir constaté de nouveau que le son produit par la contraction du masséter correspondait à 32 vibrations par seconde, fit agir sur le même muscle une bobine d'induction qui donnait 32 décharges dans le même temps, et vit que le muscle entraît alors en contraction permanente. L'illustre physiologiste reconnut que ce nombre était le minimum nécessaire pour produire l'état permanent de contraction, et de plus, que toute série de décharges induites produit dans un muscle, si elle est assez fréquente, une contraction permanente accompagnée d'un son d'une tonalité plus ou moins élevée, en raison même du nombre des interruptions du courant. Il a pu constater que le son rendu par le muscle est précisément celui que donne en vibrant l'interruption de la machine d'induction.

Vous voyez, messieurs, que les expériences que je

viens de citer montrent l'acte musculaire sous un jour entièrement nouveau. Si je vous ai donné cet aperçu sommaire de la fonction de motricité, c'est que je l'ai cru susceptible de vous faciliter l'intelligence des faits de détails que nous allons passer en revue.

3 Du rôle de l'électricité dans les phénomènes nerveux et musculaires

Messieurs,

Parmi les nombreux agents que le physiologiste applique aux nerfs et aux muscles pour provoquer des secousses ou des contractions, l'électricité est le plus important à connaître. Les expériences remarquables de du Bois-Reymond tendent à l'aire considérer le fluide électrique comme constituant essentiellement ce qu'on appelait autrefois le fluide nerveux. D'autre part, la contraction musculaire elle-même est si constamment accompagnée de phénomènes électriques, que chaque progrès nouveau de la physiologie musculaire relie plus intimement le phénomène de la contraction à une influence de l'électricité.

État électrique normal des nerfs et des muscles. –
Je serai bref sur ce point, qui se trouve exposé

aujourd'hui dans nos traités classiques, et qui peut se résumer ainsi. D'après du Bois-Reymond, il existe dans un nerf ou dans un muscle à l'état de repos, une sorte de polarité électrique entre les molécules qui s'influencent entre elles, comme le font les divers éléments d'une pile isolée. Les électricités de noms contraires ne peuvent facilement se combiner à cause de la faible conductibilité des tissus nerveux et musculaires qui sont, en grande partie, formés de liquides, et par conséquent très résistants au passage de l'électricité. Mais si un arc métallique, bon conducteur du fluide électrique, vient à réunir deux points d'un nerf ou d'un muscle qui soient de polarité différente, un courant traverse cet arc. De sorte que si l'on met les deux fils d'un galvanomètre en rapport avec ces points du nerf ou du muscle, un courant électrique est accusé par la déviation de l'aiguille qui indique à la fois la direction et l'intensité de ce courant.

A l'aide d'un galvanomètre très sensible, du Bois-Reymond a démontré comment se répartit la polarité musculaire dont je viens de parler, et par-conséquent dans quel sens et avec quelle intensité des courants tendent à

s'établir entre les divers points d'un nerf ou d'un muscle.

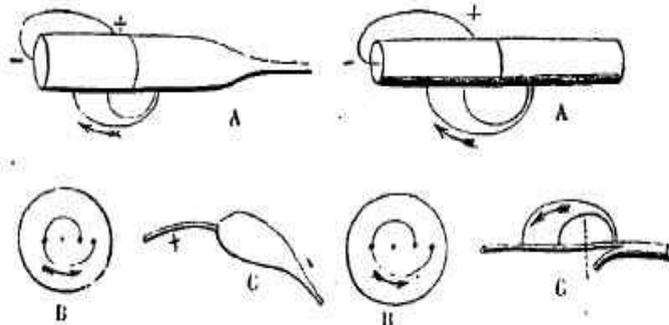


FIG. 110. — Courants propres des muscles. FIG. 111 — Courants propres des nerfs.

Comme les courants propres s'établissent dans les nerfs et dans les muscles d'une manière identique, je rapproche les unes des autres les figures qui représentent la marche de ces courants dans ces deux sortes d'organes.

La coupe transversale d'un muscle est électrisée négativement par rapport à sa surface naturelle ou longitudinale. De sorte que si l'on place dans le circuit du galvanomètre deux points d'un muscle pris sur ces deux surfaces différentes, l'aiguille de l'instrument indiquera un courant allant de la surface longitudinale à la surface transversale, comme cela est représenté en A dans la figure 110.- Si l'on opère avec un nerf assez volumineux

pour qu'on puisse toucher isolément un point de la surface extérieure et un point de la coupe, le même phénomène se produit et le sens du courant est le même que pour le muscle ; un galvanomètre qui réunirait ces deux points accuserait(A, fig. 111) un courant en tout semblable à celui que fournit le muscle ; seulement ce courant serait beaucoup plus faible. – (Le tendon d'un muscle se comporte comme sa coupe, de sorte qu'il doit être considéré comme représentant la somme des extrémités de chaque fibre musculaire, il équivaut donc à la coupe elle-même).

Une surface quelconque, longitudinale ou transversale, est le siège de polarités différentes dans ses différents points. Ce fait est également vrai pour les nerfs et pour les muscles. Voici comment cette polarité est répartie.

Sur la surface longitudinale, il existe une ligne neutre, ponctuée dans les figures, qui correspond à peu près au milieu de la longueur du nerf ou du muscle. Cette ligne laisse donc de chaque côté d'elle une quantité sensiblement égale de substance nerveuse ou musculaire.

La polarisation des molécules présente de chaque côté de cette ligne des tensions électriques décroissantes à mesure qu'on s'en éloigne. De sorte que si deux points symétriquement placés de chaque côté de la ligne neutre sont réunis par le circuit du galvanomètre, aucun courant ne se produit. Si des points inégalement éloignés de la ligne neutre, et par conséquent insymétriques, viennent à être réunis, un courant se produit, il va du point le plus rapproché de la ligne neutre à celui qui en est le plus éloigné. Des flèches indiquent la direction de ces courants en A, fig. 110 et 111.

Sur la coupe d'un nerf ou d'un muscle, on trouve également des points symétriques et insymétriques, les premiers ne donnant pas de courant, tandis que les seconds en donnent. C'est l'axe qui passerait par le centre du cylindre nerveux ou musculaire qui représente ici le point neutre. Le sens des courants est le même que dans le cas où l'on expérimente sur la surface longitudinale.

Ainsi, en B, dans la figure 110 qui représente la coupe d'un muscle, on a indiqué un point central autour

duquel la polarité serait répartie d'une manière décroissante dans les points de plus en plus rapprochés de la circonférence. Si deux points également éloignés du centre sont réunis par un arc métallique, aucun courant ne se produit, comme cela se voit pour l'arc convexe supérieurement qui, dans la figure 110, réunit deux points, symétriques. Si, au contraire, l'arc métallique réunit deux points insymétriques comme celui qui dans la même figure a la convexité tournée en bas, un courant se produit. La direction de ce courant est celle qu'indique la flèche, c'est-à-dire qu'il va du point le plus rapproché de l'axe au point le plus éloigné.

La coupe d'un nerf présente les mêmes phénomènes, la figure 111B, entièrement semblable à celle des courants de la coupe des muscles, montre comment la tension se répartit sur la coupe des nerfs.

Lorsqu'un tronçon du nerf présente un changement de volume dans son trajet, ce n'est plus au milieu de la longueur du nerf qu'il faut chercher la ligne neutre, mais c'est à un point qui correspondrait sensiblement à son centre de gravité et laisserait au-

dessus et au-dessous de lui une quantité égale de substance nerveuse. C'est à partir de cette ligne qu'il faut chercher les points symétriques et insymétriques ainsi que cela se voit en C dans la figure 111.

Quand un nerf pénètre dans un muscle, il rampe entre les fibres de celui-ci, et se trouvant en contact avec leurs surfaces longitudinales, il participe à leur électricité, et devient positif par rapport à la coupe du muscle ou à son tendon. Ainsi, en C, figure 110, le nerf et le tendon représentent deux pôles de noms contraires comme ceux d'une pile. On peut se servir ainsi du nerf et du tendon d'un muscle, pour provoquer dans le nerf d'une autre patte de grenouille un courant dont le sens est toujours le même, c'est-à-dire qu'il va du nerf au tendon.

Puisque un muscle possède en lui-même deux polarités opposées comme un élément d'une pile, ne peut-on, en réunissant entre eux différents muscles et les faisant se toucher par des surfaces électrisées différemment, produire une sorte de pile à élément multiple et susceptible par conséquent d'acquérir une tension assez considérable. C'est ce qu'a fait Matteucci à

qui l'on doit la découverte de la pile musculaire, représentée figure 112.



FIG. 112.

Chaque coupe d'un muscle, électrisée négativement ainsi qu'on l'a vu, est mise en rapport avec la surface longitudinale d'un autre muscle. Lorsque la pile musculaire est composée d'un assez grand nombre d'éléments, elle peut produire des courants qui dévient très fortement le galvanomètre même peu sensible.

Action de l'électricité appliquée aux nerfs et aux muscles. Vous l'avez vu, messieurs, c'est pendant le repos des muscles et des nerfs que se produisent les courants nerveux dont je viens de parler. Une nouvelle question se présente : quel est l'état électrique de ces mêmes organes quand ils entrent en action ?

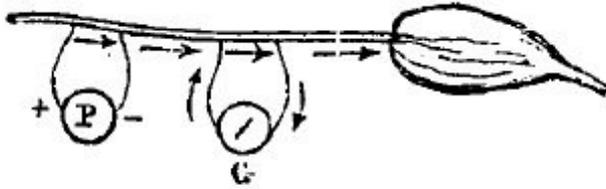


FIG. 113.

Du Bois-Reymond nous a appris encore ce qui se passe dans ces conditions. Quand un nerf est excité, son état électrique se modifie, et c'est précisément cette modification qui donne naissance à la contraction musculaire. Il se développe dans le nerf ce que Du Bois-Reymond a appelé l'état électrique, état qui, au moment où il se produit, donne naissance à une contraction, ou pour mieux dire, à une secousse musculaire. Cet état électro-tonique constitue un véritable courant électrique dont le galvanomètre peut encore indiquer l'intensité et la direction.

La figure 113 montre comment ce courant se produit sous l'influence d'une excitation galvanique. Soit une pile P dont les deux pôles seraient appliqués au nerf d'un muscle de grenouille. Au moment où le courant est

fermé et traverse la portion du nerf qui fait partie du circuit voltaïque, un courant du même sens se produit dans tout le reste du nerf, et ce courant donne naissance à une secousse du muscle. Dans ces conditions le courant qui se développe dans le nerf est de même sens que celui de la pile, il ne dure qu'un instant, après quoi le nerf conserve la nouvelle polarité que lui a donnée l'influence électrique qu'on a fait agir sur lui ; il la gardera jusqu'à la rupture du circuit voltaïque et reprendra alors sa polarité primitive.

Du Bois-Reymond a constaté que *tout changement dans l'état électrique d'un nerf produit l'excitation de celui-ci*. Sous l'influence du traumatisme et en général des différentes actions qui excitent les nerfs et font contracter les muscles, il y aurait donc une modification de l'état électrique des nerfs. Du reste, il n'est pas nécessaire de faire intervenir une électricité étrangère pour produire ces effets ; vous avez vu que pendant son état de repos le nerf était le siège de polarités différentes. Eh bien, il suffit de recombinaison les électricités contraires pour provoquer dans le nerf qui les

possède une excitation. Ainsi, lorsqu'on touche avec un arc métallique deux points différents d'un lied, l'état électrique se modifie non-seulement dans les parties touchées, mais consécutivement dans tout le reste du nerf, et une contraction s'ensuit. Ainsi s'expliquent encore les contractions qui surviennent quand un nerf est replié en anse sur lui-même, ou quand on laisse tomber sur lui une anse empruntée à un autre cordon nerveux. – Mais le fait le plus étonnant c'est la façon toute particulière dont le muscle se comporte quand il est excité. En effet, au moment où l'excitation développe dans le nerf un état électrique nouveau, le muscle, au contraire, en se contractant, perd sa polarité normale. ne sorte qu'on voit se supprimer brusquement le courant qui pendant le repos allait d'un point à un autre de sa surface.

En résumé, l'excitation d'un nerf consiste dans la destruction de son état électrique statique ou de repos. Il se produit sous cette influence un état dynamique du courant qui provoque une secousse dans le muscle correspondant. Cette secousse, pendant l'instant où elle se produit, supprime dans le muscle les polarités

opposées qui, pendant l'état de repos, donnent naissance au courant musculaire.

1 *De la contraction induite*



FIG. 114.

Vous savez, messieurs, comment l'électricité d'un nerf se recompose si l'on place un arc conducteur entre deux points de la longueur de ce nerf et comment il s'ensuit un état électro-tonique qui excite le muscle et produit une secousse. Cet arc conducteur peut être formé par un corps quelconque, métallique ou organique. Un muscle ou un morceau de nerf peuvent être employés à cet usage. Après le contact effectué et après la secousse musculaire qui en résulte, un nouvel équilibre s'établit et

persiste indéfiniment. Mais si dans l'arc conducteur il vient à se produire un phénomène électrique quelconque, celui-ci réagit à son tour sur l'électricité du nerf, en trouble l'équilibre et donne naissance à une secousse, c'est ce qu'on nomme la contraction induite. Ce phénomène a été découvert par Matteucci.

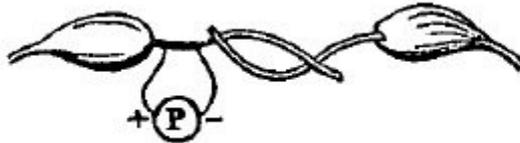


FIG. 115.

Contraction induite par un muscle. – Soient, figure 114, deux muscles munis de leurs nerfs. Le nerf du second est placé sur la surface du premier muscle, qui forme ainsi un arc conducteur entre deux points différents de la longueur de ce nerf ; d'où production d'un état électrique nouveau et secousse dans le second muscle. Après quoi, le nouvel état électrique se continuant sans changement, il n'y a pas de secousse, bien que le courant propre du premier muscle traverse constamment le second nerf. Il n'y a rien jusqu'ici qui ne vous soit connu.

Mais supposons que le courant d'une pile vienne exciter le premier nerf et faire contracter son muscle ; aussitôt le second muscle se contractera à son tour, c'est là ce qui constitue la contraction induite, Que s'est-il passé ? – D'après Matteucci, le premier muscle, au moment de sa contraction, est devenu le siège d'un courant de sens contraire à la direction normale et a modifié, par conséquent, l'état électrique du nerf qui reposait sur lui, d'où contraction dans le second muscle. Pour du Bois-Reymond, il y a eu simplement suppression de toute polarité électrique dans le premier muscle ; vous comprenez que c'est là une cause suffisante de perturbation dans l'équilibre électrique du deuxième nerf et que cela explique également bien la contraction induite.

Contraction induite par un nerf. – La figure 115 montre une anse nerveuse mise en rapport avec une autre, de façon que chacune de ces anses joue par rapport à l'autre le rôle d'arc conducteur. Une contraction se produit au moment du contact de ces nerfs, puis le repos des muscles se produit. Excitons maintenant à l'aide de la

pile P le premier nerf. L'état électro-tonique s'ensuivra dans le reste de son étendue, et le muscle correspondant se contractera ; mais en même temps, comme la partie du premier nerf qui joue le rôle d'arc conducteur par rapport au second change subitement d'état électrique, le deuxième nerf sera influencé à son tour, et son muscle se contractera. Telle est la contraction induite par l'action d'un nerf sur un autre nerf.

Les deux nerfs peuvent être placés au contact l'un de l'autre comme dans la figure 116, l'induction se produit encore, et si l'on excite par la pile la contraction de l'un des muscles, l'autre muscle se contracte également.

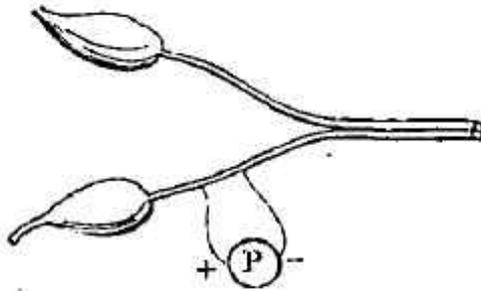


FIG. 116.

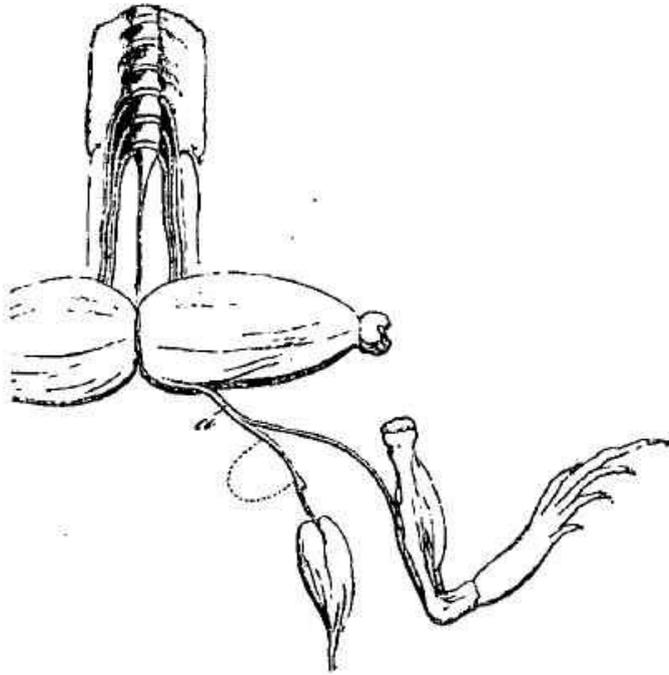


FIG. 117.

Contraction paradoxale. – Une grenouille est préparée comme dans la figure 117, son nerf sciatique est isolé, et les muscles gastrocnémiens détachés sont librement suspendus au nerf poplité interne qui les anime, tandis que le nerf poplité externe reste adhérent à la partie antérieure de la jambe. Si l'on coupe le nerf sciatique au point a, on voit que le bout périphérique de

ce nerf renferme, adossées l'une à l'autre, les origines des deux sciatiques poplités, Cette disposition représentera assez parfaitement celle de la figure 117 ; aussi, lorsqu'on viendra à exciter le nerf poplité interne, obtiendra-t-on une double contraction : l'une directe dans le muscle gastrocnémien, l'autre induite dans les muscles antérieurs de la patte. C'est ce phénomène que du Bois-Reymond, en le découvrant, avait nommé contraction paradoxale. Elle était paradoxale en effet, cette contraction, tant qu'on ne connaissait que l'action directe des nerfs sur les muscles auxquels ils se distribuent. Mais, Du Bois-Reymond lui-même, en découvrant la contraction induite, donna la clef de la contraction paradoxale qui n'en est qu'un cas particulier. Il est nécessaire, pour que le phénomène se produise, que les communications du nerf avec les centres soient supprimées, ainsi que cela a été fait pour le cas représenté plus haut ; le sciatique étant coupé au point A. On peut encore obtenir la contraction paradoxale en coupant le plexus lombaire du côté correspondant ; mais dans ce cas le succès est moins certain.

2 *Influence de la direction des courants sur leurs effets physiologiques*

Sur ce point, messieurs, la science est beaucoup moins avancée que sur les précédents. Malgré les nombreux travaux entrepris sur ce sujet, malgré les persévérantes recherches de l'école allemande à qui la physiologie du système nerveux doit tant de grandes découvertes, nous ne possédons pas encore une théorie satisfaisante des variétés d'action des courants continus, suivant leur direction dans le nerf. Je me bornerai donc à esquisser devant : vous l'état de la question avec les lacunes et même avec les contradictions qu'elle présente.

Courants agissant sur le trajet d'un nerf. – Vous avez déjà vu que les courants continus produisent des contractions à l'instant de leur clôture et à celui de leur rupture. C'est-à-dire dans leurs deux états variables, en vertu de cette loi que du Bois-Reymond a établie, à savoir : que les nerfs n'étaient excités que par un changement brusque de leur état électrique. Or, si le

courant électrique est assez fort, les deux états variables dont je viens de parler pourront agir assez énergiquement sur le nerf pour produire une secousse du muscle ; mais, à un certain degré de faiblesse de la pile, ce n'est plus que l'état variable de la clôture qui agira sur le nerf, quelle que soit la direction du courant. Tels sont du moins les phénomènes que l'on observe lorsqu'on met un nerf à nu et que, sans le diviser, on l'excite avec les deux pôles d'une pile placée sur deux points de son trajet.

Courants agissant sur un nerf coupé. – Il n'en est plus ainsi lorsque l'on agit sur un nerf coupé en travers. Ce nerf séparé des centres s'altère peu à peu et ne réagit plus de la même manière sous l'influence des excitations électriques. Alors l'excitabilité du nerf passe par des phases successives dans lesquelles on voit se comporter différemment les courants centrifuges ou directs, et les courants centripètes ou inverses.

Prenons un courant voltaïque assez fort pour exciter un nerf fraîchement coupé et pour produire des secousses dans son muscle au moment de la clôture du circuit et 'au moment de sa rupture, c'est-à-dire dans les

deux états variables. Ce sera une première période. Il en arrivera bientôt une seconde où l'on n'aura plus de secousse qu'à la clôture du courant direct et à l'ouverture du courant inverse. Enfin, dans une troisième période, le nerf demeurera insensible à la clôture comme à l'ouverture d'un courant quelconque. Nobili et Bitter qui ont étudié les changements successifs de l'excitabilité du nerf ont admis des périodes bien plus nombreuses ; je ne vous cite que les plus importantes afin de ne pas compliquer le sujet. Les autres périodes signalées par les auteurs semblent du reste n'être que des transitions entre les trois états du nerf que je viens de décrire. Comme c'est sous forme de tableaux synoptiques qu'on a l'habitude de représenter les états successifs de l'excitabilité du nerf, j'emprunterai cette méthode, et pour les trois périodes que je vous ai indiquées, nous aurons le tableau suivant :

1e période.	Clôture.	Secousse.	Secousse.
	Ouverture.	Secousse,	Secousse.
2e période.	clôture.	Secousse.	0
	Ouverture.	0	Secousse.
3e période.	Clôture.	0	0
	Ouverture.	0	0

De ces trois périodes la première s'explique facilement par l'excitabilité très grande du nerf récemment coupé, excitabilité suffisante pour que les deux états variables du courant puissent la mettre en jeu. La dernière s'explique également bien par la disparition de l'excitabilité du nerf séparé du centre depuis un certain temps. Cette explication n'est pas hypothétique, car on peut se convaincre qu'à cette période le nerf cesse de réagir sous l'influence d'une excitation quelconque, même de celle que produisent la chaleur, le pincement et les agents chimiques. Reste à interpréter la seconde période, celle dans laquelle les phénomènes diffèrent suivant le sens du courant appliqué au nerf.

Un premier fait bien constaté, c'est la disparition successive de l'excitabilité dans les différents points du nerf cette propriété se perd d'abord dans le voisinage du bout coupé et s'éteint graduellement dans les points les plus rapprochés du muscle. De sorte que si l'on pince l'extrémité du nerf, on la trouve inerte, tandis que ce même nerf provoque encore des secousses musculaires lorsqu'on le pince dans un point plus voisin du muscle.

Sur ce premier fait bien établi, Chauveau essaya de fonder une théorie de l'action des courants de différents sens appliqués aux nerfs. Il supposa que le maximum d'excitation d'un courant se produit au pôle négatif, c'est-à-dire au point où l'électricité sort du nerf. Dès lors, il devenait facile de comprendre comment un courant faible n'agit que dans le cas où son pôle négatif est appliqué à un point du nerf encore excitable. Soit par exemple un courant-induit direct, celui-ci, appliqué sur un nerf partiellement épuisé l'excitera encore, parce que le pôle négatif étant du côté du muscle agira précisément sur le point le plus excitable du nerf. Un courant inverse ne produira rien parce que ce pôle négatif agira près du bout coupé, c'est-à-dire dans un point du nerf qui n'est plus excitable. Une décharge d'électricité statique se comportera de même. Quant aux courants de pile, leur action ne peut s'expliquer dans cette théorie que d'une manière incomplète ; il est vrai que, au moment de la clôture des circuits voltaïques, la théorie rend compte des faits, car le courant direct sort par le point excitable et provoque une secousse tandis que le courant inverse qui

n'en produit pas sort précisément par le point du nerf qui a perdu ses propriétés. Mais au moment de la rupture de ces mêmes courants, la théorie de Chauveau devient insuffisante, car pour expliquer les effets qui se produisent et qui sont tout inverses de ceux qui accompagnent la clôture, l'auteur a été forcé d'admettre à la rupture d'un courant voltaïque . l'existence d'une sorte d'extra-courant de sens contraire à celui de la pile. Or, l'existence d'un pareil extra-courant est non-seulement hypothétique mais encore contraire aux opinions qui règnent parmi les physiciens. Si j'ai exposé devant vous cette théorie, c'est qu'elle est facile à retenir et qu'elle permet de prévoir la façon dont se comportera un courant électrique agissant dans telle ou telle direction sur un nerf épuisé partiellement. Son insuffisance à expliquer les effets de la rupture des courants voltaïques l'ail rejeter cette théorie comme n'étant pas l'expression de la vérité, mais lui laisse sa valeur comme aide-mémoire.

Pflüger avait déjà cherché l'explication des mêmes phénomènes dans un changement que subirait l'excitabilité du nerf sous l'influence des courants

électriques ; pour ce physiologiste, l'excitabilité augmente dans le voisinage du pôle négatif et diminue du coté du pôle positif.

Phénomènes qui compliquent l'action des courants voltaïques sur les nerfs.- L'intensité variable des courants voltaïques modifie beaucoup leur action et complique encore les phénomènes que je vous exposais tout à l'heure, Ceux-ci représentent seulement les cas les plus fréquents de l'emploi de l'électricité appliquée aux nerfs. Pour établir un accord entre les physiologistes, il faudrait d'abord leur fournir une commune mesure d'intensité pour les courants qu'ils emploient, car une variation d'intensité même légère change en fièrement les effets obtenus. Tel nerf, par exemple, qui pour un courant fort produit les effets signalés par la première période dans le tableau ci-dessus, donnera les effets de la seconde et même de la troisième période avec des courants suffisamment faibles.

Bien plus, des courants voltaïques d'une certaine intensité peuvent, lorsqu'on les applique à un nerf, donner naissance à une contraction permanente, c'est-à-

dire, d'après notre définition précédente à une série de secousses musculaires assez fréquemment répétées pour produire l'état tétanique. Ce fait observé par du Bois-Reymond lui-même contredisait sa loi, puisque le nerf était excité, non-seulement pendant l'état variable du courant électrique, mais encore pendant son état permanent. Du Bois-Raymond supposa que des actions chimiques produites par le courant de la pile étaient la véritable cause de l'excitation du nerf à laquelle le courant lui-même n'aurait aucune part directe. Mais Pflüger a montré que ce ne sont pas les courants forts qui produisent le mieux cet effet tétanisant, et qu'un nerf dont le muscle n'éprouve de secousses qu'à la clôture et à l'ouverture d'un courant assez fort, fournira la contraction permanente avec un courant bien plus faible et dont l'action électrolytique sera par conséquent moins prononcée.

Ce n'est pas tout. Cette action chimique du courant s'accompagne d'une polarisation des molécules du nerf qui finit par offrir une résistance considérable aux courants qui le traversent. De là, diminution des effets

d'excitation produits par des courants de même sens, ce qu'on attribua pendant longtemps à un épuisement, à une sorte de fatigue du nerf. Mais on reconnut que l'excitabilité reparaissait lorsque des courants de sens inverse à ceux qu'on avait employés d'abord étaient appliqués au nerf. Les derniers courants avaient détruit les effets de polarisation produits par les premiers. Cette polarisation du nerf est, du reste, directement démontrable par l'emploi du galvanomètre.

Enfin, la formation de courants dérivés est encore une des complications fréquentes de l'emploi des courants électriques en physiologie. Toutes les fois qu'un nerf simplement disséqué et soulevé au-dessus des parties molles, est excité par un courant électrique, indépendamment du courant principal qui traverse la portion du nerf comprise dans le circuit interpolaire, un courant dérivé se produit à travers les autres portions du nerf et les parties molles avec lesquelles elles communiquent. Or, ce courant est de sens inverse du courant principal, et sa présence peut, dans certains cas, changer entièrement les effets que l'on devait attendre de

l'excitation électrique. C'est du moins ce qui résulte de remarquables expériences instituées par Martin Magron et Rousseau .

Je borne ici, messieurs, cet examen sommaire des effets que les courants électriques produisent sur les nerfs moteurs. Cet aperçu est bien insuffisant pour vous donner une idée des travaux entrepris sur ce sujet, mais il vous prouvera, comme je vous le disais en commençant, que la lumière ne s'est pas encore faite sur ce point de la physiologie nerveuse. La conclusion pratique qui en ressort, c'est que pour l'excitation des nerfs, il faut en général préférer les courants induits aux courants voltaïques dont l'effet est incomparablement plus complexe pour les raisons que vous venez de voir. Enfin, dans certains cas où l'on veut produire sur un nerf une excitation localisée d'une manière certaine, en un point défini, il faut renoncer entièrement à l'emploi de l'électricité et recourir à l'excitation traumatique, c'est-à-dire à la compression du nerf entre les mors d'une pince.

4 De la vitesse de la propagation de l'action nerveuse

C'est sous ce titre que Helmholtz publia en 1850 une de ses plus brillantes expériences, en montrant qu'on peut déterminer d'une manière précise le temps que l'action nerveuse met à parcourir une longueur de nerf déterminée. Diverses méthodes furent employées pour obtenir cette détermination avec le plus de rigueur possible. Après Helmholtz, Valentin reprit ces expériences et confirma les résultats obtenus par son illustre devancier.

Dans toutes ces recherches, le plan que l'on suivait consistait en ceci : 1° Exciter un nerf dans le voisinage du muscle qu'il anime, et déterminer l'intervalle qui s'écoule entre l'excitation du nerf et la contraction qui en résulte. 2° Exciter le nerf en un point plus éloigné du muscle et voir de combien le retard de la

contraction sur l'excitation s'est accru. – Cet accroissement doit nécessairement s'expliquer par la plus grande longueur que le courant nerveux doit parcourir dans le second cas, il indique donc la vitesse du courant nerveux dans la longueur du nerf sur laquelle on a opéré, et permet de déduire la vitesse absolue de ce courant. Deux méthodes successives ont été employées par Helmholtz. Dans la première série d'expériences, le savant physiologiste chercha à mesurer les intervalles qui séparent l'excitation du nerf de la contraction du muscle, en estimant par la méthode de Pouillet la durée d'un courant qui traverse un galvanomètre au moment où se produit l'excitation du nerf, et qui cesse au moment où le muscle se contracte.

Voici en quoi consiste la méthode de Pouillet. Étant donné un courant constant, celui-ci imprime une certaine déviation à l'aiguille d'un galvanomètre, mais il a besoin pour cela d'agir pendant un certain temps. Toutes les fois que la durée d'application du courant sera très courte, l'aiguille du galvanomètre n'éprouvera qu'une déviation incomplète et de plus en plus faible

quand le courant sera de plus en plus court. Or, on peut construire des tables qui indiquent la durée du courant pour chacune des déviations incomplètes du galvanomètre, ce qui permet, à la seule inspection de l'aiguille, d'estimer la durée du courant qui l'a influencée.

L'installation de l'expérience de Helmholtz était basée sur ce principe. Sur le trajet du courant qui traversera le galvanomètre est disposée une plaque métallique sur laquelle repose une pointe de métal attachée à l'extrémité d'un muscle sus pendu au-dessus de la plaque. La pointe et la plaque communiquant chacune avec un bout du fil de la pile établissent par leur contact la clôture du circuit. La moindre contraction du muscle éloignant la pointe de la plaque amènera la rupture de ce circuit. Cela posé, supposons qu'en d'autres points du circuit se trouvent une pile et un galvanomètre, l'aiguille sera déviée pendant le passage du courant à travers le fil, la plaque et la pointe métallique ; admettons enfin qu'en un point de ce circuit existe une rupture avec une touche qui permette à volonté, d'établir le contact.

Cette touche n'agit pas seulement pour fermer le courant du galvanomètre mais par un mécanisme facile à comprendre, elle rompt un autre courant et provoque ainsi la décharge d'une bobine d'induction qui va exciter le nerf en un point.

Il est clair que dans l'instant où l'on appuie sur la touche le nerf est excité, et qu'en même temps le courant du galvanomètre commence. D'autre part, à l'instant où le muscle se contracte, le circuit du galvanomètre est rompu. L'aiguille de l'instrument aura donc subi l'influence du courant pendant tout le temps qui s'est écoulé entre l'excitation du nerf et la contraction du muscle ; la durée de cet intervalle est estimée au moyen de tables, d'après la déviation que l'aiguille a subie.

Si l'on fait ainsi deux expériences comparatives en excitant deux points différents du nerf, on voit que, si l'excitation porte sur le point du nerf le plus éloigné du muscle, on obtient un plus grand retard pour la contraction. Comme moyenne de vingt-deux expériences comparatives, Helmholtz trouva que, pour parcourir une longueur de nerf de 43 millimètres, le courant employait

environ 0",00175 ce qui correspondrait à une vitesse de 24,6 m par seconde¹.

A cette méthode d'un emploi difficile, Helmholtz substitua bientôt la méthode graphique. Un cylindre tournant recevait le tracé de la contraction musculaire, ce cylindre, d'autre part, portait un excentrique qui, à un moment de sa rotation, rompait le courant d'une pile et produisait une secousse d'induction par laquelle le nerf était excité. La longueur de la ligne des abscisses, tracée sur le cylindre entre le point où l'excentrique provoquait l'excitation du nerf et celui où le muscle accusait sa contraction, servait à mesurer l'intervalle qui séparait ces deux phénomènes.

Valentin se servait d'un chronomètre à deux aiguilles dont l'une battait les dixièmes, et l'autre les millièmes de seconde. Les deux aiguilles, partant de zéro au moment où l'on excitait le nerf, étaient arrêtées dans leur course par un électro-aimant au moment de la contraction du muscle. L'espace parcouru sur le cadran

1 Müller, Archiv. für Anatomie und Physiologie, 1850. – Analyse par M. Verdet, dans les Annales de chimie et de physique, 3e série. t. XLIII. p. 378.

indiquait le temps dont on cherchait la mesure.

En vous décrivant ces différentes méthodes, je n'ai fait messieurs, que vous indiquer les principes sur lesquels elles reposent, mais ceux d'entre vous qui connaissent la complication du dispositif réel de ces appareils comprendront l'importance qu'il y aurait à le simplifier. Il faudrait que ces expériences, ramenées à un cas particulier de l'emploi des enregistreurs dont nous disposons, puissent être facilement répétées, afin qu'on puisse étudier l'influence qu'exercent différents agents sur la vitesse de transmission du courant nerveux. Helmholtz nous a appris déjà que le froid appliqué aux nerfs ralentit beaucoup cette vitesse. Quel serait l'effet des différentes substances médicamenteuses ou toxiques ?

Pour réaliser ces expériences à l'aide de l'enregistreur que vous connaissez déjà, voici la disposition que j'ai employée.

Description de l'appareil destiné à déterminer la vitesse du courant nerveux. – Au-dessus du volant de

l'enregistreur et sur le prolongement de son axe de rotation. j'établis un disque de verre enfumé D (fig. 129), tournant dans un plan horizontal. Valentin a déjà utilisé avec avantage cette disposition pour étudier les phases de la contraction musculaire. Ce disque devra, dans notre expérience, recevoir le tracé de l'excitation du nerf et celui de la contraction du muscle. Afin de déterminer avec une parfaite exactitude la vitesse de rotation dont il est animé, j'emploie la méthode de Wertheim, c'est-à-dire j'enregistre sur sa surface les vibrations d'un diapason bien réglé qui exécute cinq cents vibrations simples par seconde.

Reste à décrire l'appareil qui inscrit, d'une part, l'instant où le nerf est excité, et d'autre part, le moment où le muscle se contracte, à cet effet, j'établis sur un support une plaque carrée de cuivre portée par une virole qui reçoit l'axe vertical du support, et qu'un bouton de pression permet de fixer à la hauteur convenable.

Sur cette plaque est couché le muscle gastrocnémien d'une grenouille, adhérent d'une part au fémur qu'une pince P maintient fixe, tandis que le tendon

C est accroché au petit bras d'un levier coudé dont le bras le plus long lm , va frotter par son extrémité pointue sur la surface du disque. Chaque contraction du muscle déviara le levier et tracera sur le disque l'indication de ce mouvement. Le nerf qui doit être excité est représenté dans la figure, soulevé en l'air et sus pendu sur de petits crochets métalliques qui sont les pôles des courants induits par lesquels il sera excité.

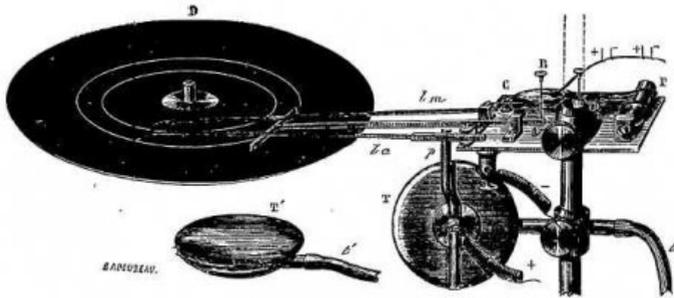


FIG. 129. — Appareil pour déterminer la vitesse du courant nerveux.

À côté du *levier musculaire* lm , il en est un autre tout semblable le , destiné à signaler le contact par lequel sera fermé le courant électrique qui provoquera l'excitation du nerf. Ce levier, à sa base, est formé d'une pièce métallique qui communique par une borne placée au-dessous de la plaque avec un pôle d'une pile, dans la

figure, c'est le pôle négatif. Le levier-contact est flexible à sa base ; on peut, à un moment donné, faire battre contre lui une tige de cuivre p qui communique avec le pôle positif de la pile. ce choc, en fermant le courant voltaïque, déviera le levier-contact et signalera par conséquent dans le tracé l'instant précis de la clôture du courant.

Voici comment je produis ce contact sans toucher directement à l'appareil dont un ébranlement même léger pourrait troubler les indications. Au-dessous des pièces précédemment décrites est placé dans le plan vertical un tambour métallique semblable à ceux du cardiographe. La face de ce tambour qui est visible dans la figure est fermée par une membrane de caoutchouc qui se soulève, lorsque par le tube t on insuffle de l'air dans le tambour. Cette membrane, en se gonflant, fait basculer la pièce métallique dont l'extrémité p vient frapper le levier-contact et fermer le courant. Pour produire cet effet, je me sers d'un autre tambour T' semblable au précédent, et dont le tube t' , représenté rompu dans la figure, se continue avec le tube t , Ce second tambour

étant placé à quelque distance de l'appareil, il suffit de presser brusquement sa membrane pour produire la clôture du courant et la déviation du levier qui la signale.

Au-dessous des deux leviers est une bascule en forme de T qui se lève quand on presse sur le bouton B et qui soulève ainsi les deux leviers à la fois, de façon à les empêcher de frotter sur le disque. Cette disposition permet de commencer ou d'arrêter à volonté le tracé à un moment quelconque, et par conséquent de ne recueillir au besoin que la contraction de clôture ou celle d'ouverture du courant.

Enfin, pour exciter le nerf, j'ai disposé en haut de l'appareil et sur le prolongement de l'axe que figure une double ligne ponctuée, j'ai disposé, dis-je, une pièce qui soutient en les isolant les unes des autres, les quatre extrémités de fils électriques dont les bouts contournés en crochets supportent le nerf qu'ils doivent exciter. Ces fils communiquent avec une bobine d'induction que l'on peut, au moyen d'un commutateur, mettre en rapport tantôt avec les deux excitateurs les plus rapprochés du muscle, tantôt avec ceux qui en sont les plus éloignés.

(La figure représente à tort ces deux couples de crochets excitateurs beaucoup trop rapprochés l'un de l'autre ; dans l'intérêt de l'expérience, il faut, au contraire, les éloigner l'un de l'autre le plus qu'il est possible.)

L'induction dans la bobine est produite par le courant voltaïque dont le levier *le*, accuse la clôture et l'ouverture. On peut, sans crainte d'erreur, considérer comme synchrones la clôture ou la rupture du courant inducteur avec l'excitation du nerf par les courants induits qu'elles déterminent. Ceci connu, je vais, messieurs, exécuter devant vous l'expérience.

Expérience. – Je prends la grenouille la plus grosse que je puisse trouver, afin d'obtenir une longueur de nerf aussi grande que possible entre le plexus lombaire et la pénétration du nerf dans le gastrocnémien. Après avoir isolé le nerf et ruginé le fémur, je détache le tendon du gastrocnémien et décolle ce muscle dans toute sa longueur, puis je coupe la patte de la grenouille au-dessous du genou, en laissant le gastrocnémien seul adhérent au fémur. Je fais alors dans le tendon du muscle une ouverture qui sert à l'accrocher à l'extrémité du

levier coudé, puis je serre le fémur dans les mors de la pince P qui le maintient fixe. Une légère traction exercée sur cette pince tend le muscle très faiblement, mais assez toutefois pour que sa contraction agisse immédiatement sur le levier. Je place alors le nerf sur les crochets excitateurs et je vais placer les leviers sur le cylindre qui recevra leur tracé. Pour cela, je presse sur la bascule B et soulève ainsi les leviers qui ne touchent pas la surface du disque, pendant que je les mets en position, c'est-à-dire que je place leur pointe sur le prolongement d'un rayon du cercle représenté par le disque. Ceci étant fait, je laisse retomber la bascule, elles deux leviers, venant appuyer sur le verre, tracent par leurs pointes deux cercles concentriques.

Le commutateur est actuellement placé de telle sorte que le courant induit va exciter la partie du nerf la plus éloignée du muscle. Je presse sur le tambour T, le courant inducteur est fermé, et le levier-contact le, dévié à gauche. Le courant induit excite le nerf, et le muscle se contracte, déviant à droite le levier musculaire *lm*. À ce moment j'arrête l'expérience, et pressant de nouveau sur

le bouton B, je soulève les leviers au moyen de la bascule, et empêche la rupture du courant de compliquer ce premier tracé en produisant une nouvelle contraction du muscle.

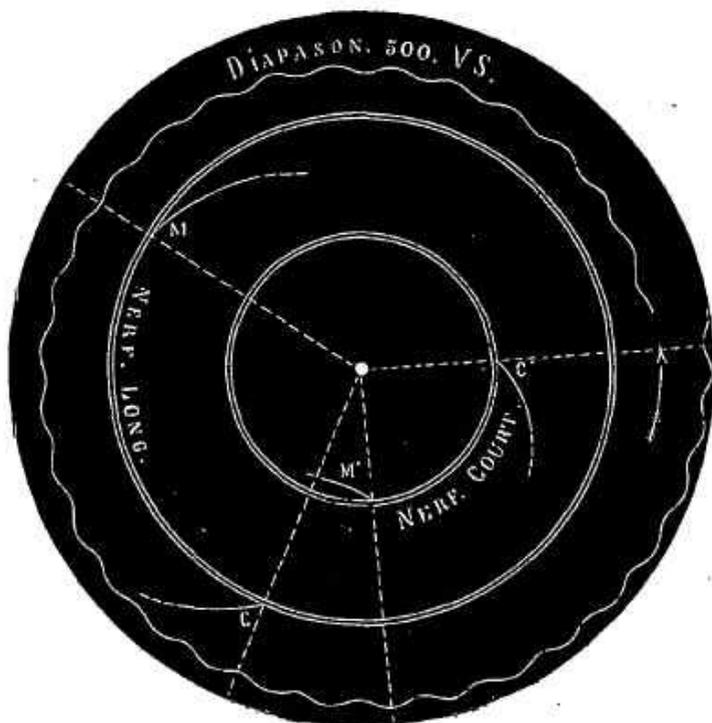


FIG. 130.

Je passe alors à la seconde expérience, et plaçant les leviers au-dessus d'un autre point du disque, je

m'apprête à y produire un nouveau tracé. Je dispose cette fois le commutateur de manière à exciter le point du nerf le plus rapproché du muscle, et je procède comme tout à l'heure. Une fois que j'ai obtenu le tracé de la contraction et le signal de la clôture du courant, j'enlève de nouveau les leviers, et l'expérience est finie.

Reste à déterminer la signification du tracé obtenu. Pour cela, je commence par déterminer la vitesse de rotation du disque, et pendant que celui-ci continue à tourner, je fais vibrer ce diapason de cinq cents vibrations simples, et j'inscris les mouvements du style que porte une des branches de ce diapason, J'arrête alors le disque et je trouve qu'il présente les tracés suivants.

La figure 130 représente, réduit au demi-diamètre, le disque enfumé et les tracés qu'il a reçus. À la circonférence du disque, vous voyez des courbes onduleuses tracées par les vibrations du diapason. Chacune de ces courbes correspond à une durée de $1/250^e$ de seconde, C'est d'après cette graduation que nous estimerons l'intervalle qui sépare l'excitation du nerf de la contraction musculaire qui la suit. – En nous

l'approchant du centre du disque, nous trouvons une double ligne circulaire tracée par les pointes des deux leviers ; le trait le plus extérieur appartient au levier-contact, le plus intérieur est tracé par le levier musculaire. Le moment où le courant inducteur est fermé, et conséquemment l'instant de l'excitation du nerf, est signalé par une déviation du levier contact un point C'. ce levier trace une courbe qui se détache assez nettement de la ligne circulaire en se portant vers la circonférence. On n'a représenté que l'origine de cette courbe afin d'éviter la confusion dans la figure. (Une flèche indique le sens dans lequel tourne le disque.) À peu de distance à gauche du point C', on voit se détacher du cercle tracé par le levier musculaire une courbe analogue, qui, produite par la contraction du muscle, indique, par son début en W, l'instant précis où ce mouvement prend naissance.

Pour évaluer le temps qui s'écoule entre ces deux signaux, il suffit de déterminer combien de vibrations du diapason et combien de fractions de ces vibrations sont comprises dans l'espace angulaire qui sépare les points

C' et N'. Pour cela, un fil terminé en anse est attaché à l'axe du disque, et, tendu d'autre part sur la circonférence de ce disque, il représente exactement le rayon du cercle. Faisons-le passer d'abord par le point C', et traçons sur le disque la direction de ce rayon ; tendons maintenant le fil en le faisant passer par le point M', et traçons ce nouveau rayon : il est bien évident que les intervalles compris entre les rayons C' et M' correspondent à des temps égaux, puisque, pour tous, la vitesse angulaire est la même. L'espace C'M' sera donc égal en durée au nombre de vibrations du diapason comprises entre les deux rayons, c'est-à-dire qu'il correspondra à $\frac{8,5}{250}$ de seconde, On mesurera de la même manière l'intervalle qui sépare les points C' et M', c'est-à-dire le temps qui s'est écoulé entre l'excitation du nerf et la secousse musculaire dans la deuxième expérience, et l'on trouvera cet intervalle égal à $\frac{9}{250}$ de seconde. Or, la première expérience était faite en excitant le point du nerf le plus rapproché du muscle ; la deuxième, en excitant le point le

plus éloigné ; la différence, égale à $\frac{1}{500}$ de seconde, représente le temps employé par le courant nerveux à parcourir la longueur du nerf qui sépare les deux points excités successivement, cette longueur est, dans le cas présent, de 5 centimètres, On en déduira facilement la vitesse absolue du courant nerveux qui, pour ce cas, serait de 20 m/s.

Cette disposition de l'expérience n'est peut-être pas la meilleure d'une manière absolue, car elle complique un peu la lecture du tracé. Celui-ci, en effet, n'est plus rapporté aux abscisses rectilignes que nous ayons employés jusqu'ici, mais à des abscisses circulaires. Un autre inconvénient, c'est que le tracé recueilli sur un verre enfumé doit être enfumé après chaque expérience, tandis qu'il serait très utile de conserver les tracés obtenus pour les comparer entre eux. Si j'ai employé ce procédé, c'est uniquement pour vous montrer que l'enregistreur ordinaire peut au besoin servir à cette délicate expérience. Mais il est préférable d'employer, à la place du disque, un léger cylindre

tournant, ce qui reproduit à peu près l'expérience de Helmholtz.

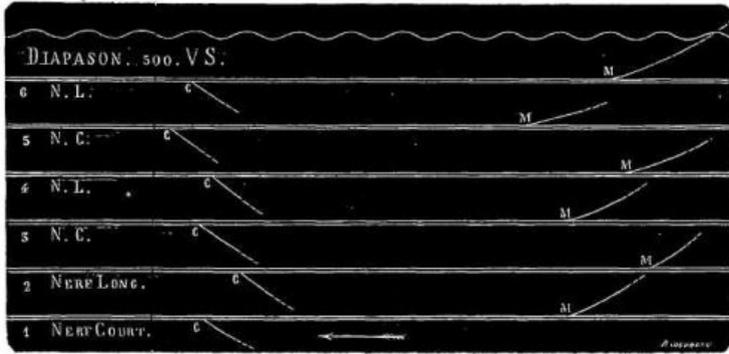


FIG. 131.

Sur l'axe du volant d'un régulateur de Foucault, je place ce léger cylindre enfumé, et, couchant l'instrument sur le côté, j'obtiens la rotation du cylindre autour d'un axe horizontal. J'applique sur ce cylindre les extrémités des leviers de l'appareil, et j'opère comme tout à l'heure. Après chaque expérience, je place les extrémités des leviers sur un point différent du cylindre, et je puis ainsi obtenir une série d'expériences successives. Le tracé obtenu dans ces conditions est le suivant (fig. 131) : vous y voyez les mêmes résultats que tout à l'heure, avec cette différence, qu'ils sont rapportés à des abscisses horizontales, ce qui rend la lecture plus

facile.

Le point C, dans chaque expérience, exprime l'instant du contact électrique ; le point M, l'instant de la secousse musculaire. La flèche, en bas de la figure, indique le sens de la rotation du cylindre.

Pour connaître l'intervalle qui sépare l'excitation du nerf de la secousse musculaire, on porte au compas chacune des longueurs CM sur la ligne du diapason.

La différence de cette longueur pour les expériences première et deuxième est d'environ $f/4$ d'une vibration double du diapason, soit $\frac{1}{333}$. Il en est de même pour les expériences troisième et quatrième comprises entre elle. Enfin, les expériences cinquième et sixième donnent pour différence environ $\frac{1}{250}$ de seconde.

– La longueur du nerf qui sépare les deux points successivement excités est de 45 millimètres pour tous les Cas.

De là peut se déduire la vitesse de transmission du

courant nerveux qui est, pour les expériences première et deuxième, troisième et quatrième, de 14 m/s, et pour les expériences cinquième et sixième, de 11 mètres seulement.

De toutes ces expériences ressort un fait curieux signalé par Helmholtz : c'est que la plus grande partie du temps qui s'écoule entre l'excitation du nerf et la secousse du muscle n'est pas occupée par la transmission du courant nerveux ; celle-ci, par exemple, ne dure que

$\frac{1}{500}$ de seconde ; mais un temps beaucoup plus long,

$\frac{1}{30}$ environ de seconde, s'écoule entre le moment où

le muscle doit avoir reçu l'excitation et celui où il réagit. À moins d'admettre que le courant nerveux parcourt avec une lenteur extrême la partie du nerf intramusculaire, il faut bien supposer qu'il existe entre l'excitation reçue et la secousse une pause ou temps perdu d'assez longue durée. On peut, du reste, constater l'existence de cette pause en excitant directement le muscle et non plus le nerf qui l'anime.

Tels sont, messieurs, les principaux faits que l'expérimentation nous apprend relativement à la vitesse de transmission de l'agent nerveux, Ils semblent, au premier abord, fort concluants ; et pourtant, ces mesures que je viens de prendre moi-même devant vous me laissent encore des doutes. Peut-être partagerez-vous mon incertitude quand nous aurons com paré, au point de vue de la transmission, l'agent nerveux et le fluide électrique.

De la propagation des courants électriques comparée à celle de l'agent nerveux.- L'idée qui présida aux recherches de Helmholtz et de Valentin, semble avoir été la suivante : Il existe entre le fluide électrique et ce qu'on nomme fluide ou agent nerveux de nombreuses ressemblances, mais il semble exister aussi des différences importantes. La détermination de la vitesse du courant nerveux, comparée à celle de l'électricité, doit-elle rapprocher l'un de l'autre les fluides électriques et nerveux, doit-elle au contraire les différencier davantage ?

Or, l'expérience a montré à Helmholtz que le courant nerveux semble parcourir une longueur de 24 m/

s ; vous venez de voir dans les expériences précédentes des vitesses encore moindres, 20, 14 et même 11 mètres, ce qui est une lenteur extrême lorsqu'on compare cet espace à celui que parcourrait l'électricité dans le même temps avec la vitesse qu'on lui assigne d'ordinaire. On a supposé en effet que la vitesse de l'électricité serait égale à celle de la lumière, et qu'elle parcourrait environ 318 000 km/s.

Sur ce sujet, messieurs, les idées scientifiques ont subi des modifications profondes pendant ces dernières années surtout. Ce que l'on croyait comprendre clairement sous le nom de vitesse de l'électricité a perdu sa signification première, et n'en a plus guère aujourd'hui. En 1827, Ohm avait calculé les lois de la distribution des tensions dans un fil conducteur pendant les instants qui suivent la fermeture d'un courant électrique. Il avait vu que l'électricité se transmet comme la chaleur, c'est-à-dire qu'elle n'arrive à sa répartition définitive dans le fil métallique qu'après avoir traversé une première phase d'état variable. La comparaison de Ohm va fournir un excellent moyen de faire comprendre

en quoi consiste l'état variable et l'état permanent. – Soit un barreau de fer qu'on plonge par une de ses extrémités dans de l'eau bouillante qui constitue une source constante de calorique. Ce barreau à son extrémité immergée va se mettre en équilibre de température avec l'eau bouillante, et ce pendant les points non immergés seront encore bien peu échauffés, ils pourront même être froids pour peu qu'on observe un point assez éloigné de la source de chaleur. Si l'on attend quelques instants, on voit que la température de la tige s'est élevée dans les points distants de la source de chaleur, et qu'il faut s'éloigner davantage de cette extrémité pour trouver une partie qui semble froide au toucher. Plus tard encore, la chaleur se sera propagée plus loin dans la barre, elle pourra même l'avoir envahie tout entière. Dans ces trois moments successifs, si l'on eût appliqué des thermomètres sur différents points du barreau, on eût vu que dans le voisinage de la source de chaleur la température a atteint dès les premiers instants le degré maximum, celui de la source de chaleur elle-même, tandis que dans les autres points les températures allaient

en décroissant à mesure qu'on l'éloignait de cette source. A chaque observation successive on eût vu que la température restait fixe au point par lequel la chaleur entraît dans le barreau, et que ce qui variait c'était le niveau des thermomètres plus éloignés de la source, et la position du point où s'arrêtait l'échauffement. Enfin que, dans tous les cas, l'intensité de la chaleur décroissait à partir de l'extrémité soumise à l'action de la source de chaleur. En étudiant sur des barreaux de métal les lois de la transmission de la chaleur, Biot a vu que les thermomètres indiquaient par leurs niveaux la décroissance de la température dans les différents points du barreau ; il a vu aussi que ces thermomètres, sauf le premier, donnaient d'instant en instant des indications variables. Mais, à un moment donné, au bout de trois ou quatre heures quelquefois, tous ces instruments s'arrêtaient chacun à un degré fixe, exprimant, par la pente générale de leurs niveaux, la répartition de la chaleur dans la barre, et prouvant par leur fixité qu'après son état variable la distribution du calorique avait atteint son état permanent.

Ce qui se passe dans la transmission du calorique correspond sous une forme excessivement lente aux différentes phases de la transmission de l'électricité dans un fil. Si l'une seulement des extrémités de ce fil est en rapport avec une source constante d'électricité, pendant que l'autre est en rapport avec la terre, la tension électrique s'élèvera aussitôt à son maximum dans cette première partie du fil, tandis qu'elle sera encore très faible dans les points situés à une plus grande distance. Plus tard, les points du fil, de plus en plus éloignés, auront atteint une tension plus élevée, mais toujours inférieure à celle des portions initiales. Enfin, à un moment donné, il y aura une certaine tension électrique pour chaque point du fil ; la tension ira en décroissant de l'entrée à la sortie, mais, pour chaque point du fil, sera dans un état permanent.

Étant admis ce mode de transmission dans un fil, on conçoit que la tension décroissante du fluide électrique dans les points successifs du conducteur ne permettra pas de déterminer avec précision le point le plus éloigné auquel l'électricité sera parvenue, La

théorie fera admettre, dès les premiers instants de la clôture du courant, l'existence d'une tension infiniment faible, même dans des points très éloignés de l'origine du fil ; mais quel moyen assez sensible emploiera-t-on pour constater l'existence de cette tension ? Supposons en effet le cas d'une ligne télégraphique, un courant étant lancé dans le fil, il s'écoule un certain temps avant que le signal électro-magnétique se produise à une certaine distance, Dira-t-on que l'électricité n'a fait son apparition au poste d'arrivée qu'au moment où le signal s'est produit ? Assurément non, car on conçoit que l'action magnétique n'ait atteint le degré voulu, pour produire le signal, qu'après une certaine durée de l'état variable, pendant laquelle la tension électrique augmente d'intensité. Ces lois du transport du courant électrique sont aujourd'hui bien établies, non-seulement par les travaux de Ohm, mais aussi par les expériences récentes de M. Gaugain et de M. Guillemin. Le premier a surtout bien démontré la répartition des tensions pendant l'état permanent. Le second a déterminé avec une admirable précision les différentes phases des états variables de

clôture et de rupture des courants.

Cette longue digression dans le champ de la physique était indispensable pour montrer comment on doit comprendre aujourd'hui la propagation du courant électrique et quelles conséquences devront induire relativement aux phénomènes nerveux tous ceux qui, frappés de l'analogie que présentent sur tant de points des deux fluides, voudront pousser la comparaison jusqu'au bout.

La question se pose aujourd'hui d'une manière nouvelle. Ainsi, il est reconnu que la durée de l'état variable des courants électriques dans les fils métalliques n'est pas proportionnelle à la longueur de ces fils, mais au carré de leur longueur, il faudra donc savoir si dans des expériences comparatives faites sur des longueurs de nerf plus ou moins grandes on trouve le retard proportionnel aux longueurs du nerf où à leurs carrés. – Enfin, il sera curieux de comparer la vitesse de transmission pour des courants de natures, de sens, d'intensités variables ; pour des nerfs soumis à différentes conditions, et dont les muscles auront à

vaincre des résistances plus ou moins grandes. Je ne puis, messieurs, que soulever ces questions dont la solution ne pourra être obtenue qu'au prix de longues recherches, et j'aborde les phénomènes qui se passent dans les muscles pour y produire le mouvement.

5 Des phénomènes musculaires.

Messieurs,

Dans la précédente séance, nous avons vu comment l'action nerveuse chemine à travers les nerfs ; nous savons que le muscle, lorsqu'il a déjà reçu l'excitation, reste un certain temps avant de réagir, c'est ce temps d'arrêt que Helmholtz a appelé pause ou temps perdu. Nous allons étudier aujourd'hui les phénomènes qui se passent dans le muscle lui-même.

Voici une patte de grenouille dont le nerf est isolé. Je soumets ce nerf à des excitations variées, courants voltaïques, courants induits, pincement, etc. Dans tous ces cas la patte réagit de la même manière. Au bout d'un temps que nos sens ne peuvent apprécier, mais que vous avez pu mesurer à l'aide des appareils enregistreurs, cette patte donne une convulsion brusque, violente, de très courte durée. Cette convulsion ne ressemble eu rien aux mouvements prolongés et réglés que l'animal exécutait

pendant la vie. C'est qu'en effet ce mouvement diffère notablement de la contraction proprement dite, et je vous ai dit à l'avance² que la contraction est constituée par une série de secousses très fréquentes qui, fusionnées entre elles, donnent naissance à un raccourcissement plus ou moins prolongé du muscle ; c'est ce qui constitue la contraction proprement dite.

Jusqu'ici, l'auscultation seule a révélé la complexité de la contraction musculaire. J'espère vous prouver, que l'emploi de la méthode graphique permet de pousser, plus loin la connaissance de ce phénomène. C'est au moyen des appareils enregistreurs que je vais essayer de résoudre les questions suivantes :

1° Quels sont les caractères d'une secousse musculaire ?

2° Comment les secousses s'ajoutent-elles les unes aux autres pour produire la contraction ?

3° Quelle est l'influence du nombre des secousses sur l'intensité de la contraction musculaire ?

2 Voyez la deuxième partie

De la secousse musculaire ; des moyens d'en déterminer graphiquement la forme.

Helmholtz, le premier, a donné des tracés graphiques de la secousse musculaire. La figure 135 est empruntée à ce physiologiste.



FIG. 135.

Ce graphique représente une secousse unique ; les ondulations qui accompagnent chacune de ses deux périodes, celle d'ascension et celle de descente, correspondraient à des saccades dans le mouvement par lequel le muscle se raccourcit et se relâche. Ces tracés datent d'une époque déjà reculée et sont entachés d'erreurs qui me paraissent tenir à la disposition vicieuse de l'appareil. Dans les petites ondulations isochrones entre elles qui viennent se surajouter, pour ainsi dire, au mouvement général, il ne faut voir que les oscillations isochrones que produit un poids suspendu à l'extrémité du muscle. Ce muscle, en effet, est élastique, et comme

tel doit nécessairement permettre au poids qui le distend d'osciller d'une façon rythmée. Du reste, un autre graphique de la secousse musculaire a été donné par Helmholtz lui-même ; il diffère notablement du précédent. Voici ce graphique (fig.136) que j'emprunte au Traité de physiologie de M. Béclard.

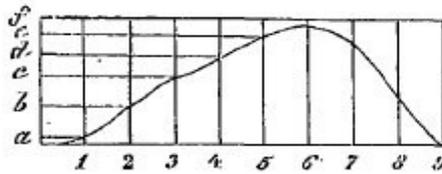


FIG. 136.

On ne voit plus, dans cette seconde figure, les petites oscillations que présentait la première, et cela vient justifier l'idée que j'émettais tout à l'heure, que ces oscillations étaient accidentelles et produites par la disposition même de l'appareil enregistreur. En comparant les figures 135 et 136, on voit encore entre elles des différences frappantes. – 1° Au point de vue de la durée absolue de la secousse : la première correspond environ à trois cinquièmes de seconde, la seconde à trois

dixièmes³ ; – 2° au point de vue de la durée relative des périodes d'ascension et de descente qui correspondent, la première au raccourcissement du muscle, la deuxième au retour de celui-ci à ses dimensions normales. Or, dans le premier tracé ; l'ascension occupe le quart de la durée totale, dans le second il en occupe les deux tiers.

Vous verrez tout à l'heure que la secousse musculaire peut présenter des caractères différents, suivant qu'elle est fournie par un muscle frais ou par un muscle fatigué. Mais outre ces conditions physiologiques qui modifient la fonction musculaire elle-même, le graphique peut-être altéré par une imperfection de l'appareil enregistreur. Aussi, malgré les règles générales que je vous ai déjà données relativement à la construction des appareils, je dois insister de nouveau sur la nécessité d'employer un levier très léger. En effet, toutes les fois qu'il est animé d'un mouvement très rapide, le levier présente un danger, celui de déformer le mouvement par

- 3 Ces mesures de la durée des secousses musculaires sont empruntées au Mémoire de Helmholtz et à la Physiologie de Béclard ; elles ne ressortent pas de la mesure des deux graphiques précédents pour lesquels on a employé des appareils animés de vitesses différentes.

sa vitesse acquise. Cet effet n'est à craindre que si le mouvement qu'on enregistre est rapide, mais il croît avec la rapidité même du mouvement communiqué. Or, comme la vitesse acquise est un effet du poids du levier, il faut diminuer ce poids autant que possible pour atténuer le plus qu'on peut celle cause d'erreur. En myographie, plus que dans tout autre cas de l'emploi du graphique, il faut faire des leviers très légers, de telle sorte que le mouvement propre à l'appareil soit infiniment faible et s'éteigne dans les frottements, si minimes qu'ils soient, de la plume sur le papier. Alors les mouvements communiqués à l'instrument par le muscle, beaucoup plus énergiques que les précédents, s'enregistrent seuls et sans erreur sensible.

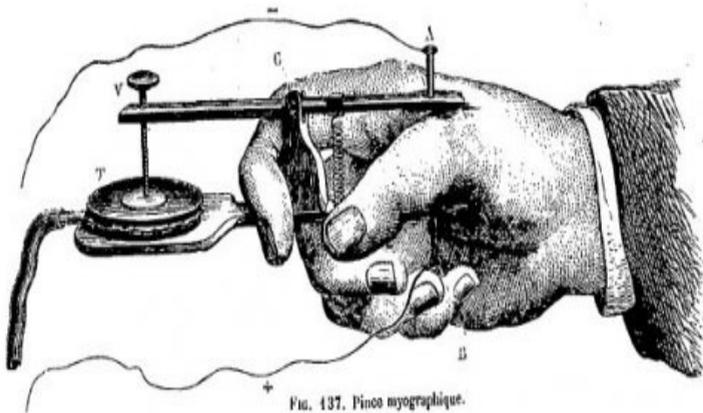
1 Disposition des appareils.

Il y a diverses manières de recueillir le mouvement musculaire que l'on veut enregistrer. On sait

qu'un muscle qui se contracte ne change pas pour cela de volume et qu'il gagne, précisément en largeur ce qu'il perd en longueur. On peut donc, à volonté, transmettre au levier enregistreur les mouvements produits par les changements de longueur du muscle ou ceux que produit son changement de diamètre dans le sens transversal. Celle dernière méthode rend possible l'expérimentation sur l'animal vivant et même sur l'homme, ce qui étend beaucoup le domaine des études myographiques et pourra fournir au clinicien de nouveaux moyens de diagnostic dans les affections de l'appareil musculaire.

En expérimentant sur la grenouille, je me servais du myographe que vous connaissez déjà ; celui qui nous a servi à déterminer la vitesse du courant nerveux. Je supprime dans cet appareil⁴ le levier contact *le* et je ne conserve que le levier *lm* mis en mouvement par le raccourcissement du muscle. Un cylindre tournant autour d'un axe horizontal servira à recevoir le graphique.

4 Voyez la quatrième partie.



Quant au myographe qui permet d'étudier sur le vivant les phénomènes musculaires, voici quelle est sa disposition.

La figure 137 représente cet appareil que j'appellerai *pince myographique*. Il se compose de deux branches a et b s'articulant au point c, de telle sorte que la branche a puisse basculer autour de ce point comme le fléau d'une balance. Deux disques de métal sont placés aux extrémités des deux branches. Chacun de ces disques communique par un fil avec l'un des pôles d'une bobine d'induction à glissière comme celle de du Bois-Reymond. Un ressort à boudin rapproche l'une de l'autre les deux branches et en forme une pince qui saisit entre

les deux disques de métal le muscle dont on veut enregistrer la contraction. D'autre part, les deux branches de la pince se continuent en arrière de leur articulation c, la branche inférieure porte sur son prolongement un tambour à air T dont la membrane est tournée en haut et reçoit le contact d'une vis de pression v qui traverse le prolongement de la branche supérieure. On conçoit que si le muscle saisi entre les deux mors de la pince reçoit, à travers les disques de métal, une décharge électrique, la secousse du muscle, traduite par un gonflement subit de celui-ci, écartera les mors de la pince et, par un mouvement de bascule, fera presser la vis v sur la membrane du tambour. Ce mouvement communiqué à l'air du tambour se transmet au moyen d'un tube de caoutchouc à un deuxième tambour dont la membrane reproduit à distance tous les mouvements du muscle. Un levier de myographe, mis en mouvement par cette seconde membrane, écrit sur un cylindre la secousse ou la série de secousses produites par le muscle auquel est appliqué la pince myographique.

Dans la figure 137, ce sont les muscles de

l'éminence thénar qui sont saisis entre les mors de la pince.

2 De la forme réelle d'une secousse musculaire.

Malgré toutes les précautions que l'on puisse prendre dans la construction des appareils, il reste toujours dans le tracé une certaine déformation qui tient à plusieurs causes. D'une part, à ce que la pointe du levier, qui s'élève et s'abaisse tour à tour, ne se meut pas suivant une ligne verticale, mais décrit un arc de cercle dont le rayon est donné par la longueur même du levier. D'autre part, le levier est animé d'une vitesse si grande, qu'il entre presque toujours en vibration et trace une ligne légèrement onduleuse au lieu d'une courbe simple qu'il devrait enregistrer sans cet accident. De ces diverses causes résulte, dans le tracé, une légère déformation qui pourrait facilement se corriger en vertu des

considérations suivantes :

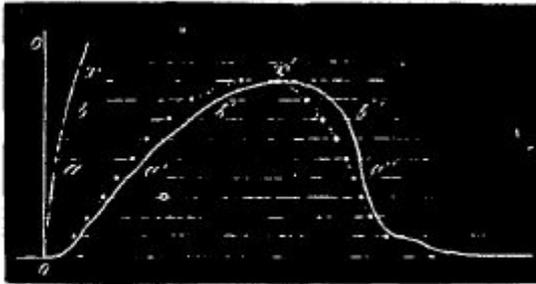


FIG. 438.

La courbe ox étant fournie par une secousse musculaire, il faut d'abord lui faire subir la correction de l'erreur due à l'arc de cercle qui a le levier pour rayon. Soit o l'origine de la courbe. Si le cylindre était immobile et que le levier s'élevât jusqu'au niveau du maximum x , il décrirait, non pas la verticale qui part du point o , mais l'arc de cercle qui se détache du même point. Plus le levier s'élèverait, plus il s'écarterait de la verticale pour se porter sur la droite. Or, pendant que le cylindre tourne, le levier décrit toujours le même arc et déforme le tracé en déviant chaque point de la courbe sur la droite, et cela d'autant plus fortement que le levier s'élève plus haut. On peut diminuer cette cause d'erreur en augmentant la

longueur du levier ; mais alors intervient une autre influence fâcheuse, celle des vibrations qui se produisent d'autant plus facilement que le levier est plus long.

Voici comment il faudrait procéder si l'on voulait corriger l'erreur que produit dans ce graphique l'arc de cercle décrit par le levier de l'instrument. En prenant au compas la longueur du levier, et avec cette longueur comme rayon, on trace (fig. 138) un arc de cercle dont le centre serait sur la ligne des abscisses prolongée et qui s'élèverait du point 0, origine de la courbe. Menons parallèlement à la ligne des abscisses autant de droites que nous voudrons ; chacune d'elles coupe à la fois la verticale, l'arc de cercle et la courbe tracée par le muscle ; cette dernière est même coupée en deux points par chaque ligne horizontale. Or, les points coupés par chacune de ces lignes sont tous situés à une même hauteur et auront tous subi une déviation semblable ; il faudra donc les ramener tous vers la gauche d'une même quantité, Celle quantité sera indiquée pour chaque point par la distance qui sépare, à ce même niveau, l'arc de cercle et la verticale. Ainsi les points a' et ail devront être

reportés sur la gauche d'une longueur égale à la distance oa ; les points b' et b'' , une longueur égale à ob ; le sommet x' , d'une longueur égale à ox . En effectuant 'elle correction pour un grand nombre de points pour la courbe, on obtiendra une courbe nouvelle qui représentera plus fidèlement les mouvements musculaires. – L'influence de l'arc de cercle sur la forme du graphique est d'autant plus prononcée que la translation du papier est plus lente. Il n'est pas nécessaire d'insister plus longuement sur ces phénomènes dont l'évidence est suffisante.

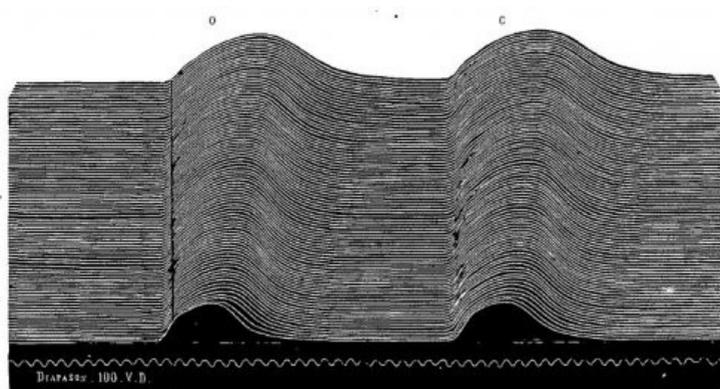


FIG. 439.

Les effets de la vibration du levier sont plus difficiles à démontrer. Le graphique obtenu par

Helmholtz (fig. 135), sans emploi d'un levier, pourrait faire croire que ces ondulations sont bien réellement produites par des variations rythmées dans le raccourcissement du muscle. Je maintiens toutefois mon opinion sur la nature de ces ondulations, et cela pour la raison suivante. D'abord l'intensité de ces ondulations est toujours en raison de la brusquerie avec laquelle le levier est mis en mouvement par le muscle, Dans le graphique de Helmholtz, on voit ces vibrations faibles, au commencement de la secousse, s'éteindre peu à peu à la manière des oscillations pendulaires. Leur intensité est à son maximum dans les cas où la secousse présente la brusquerie d'un véritable choc, et diminue lorsque le muscle se raccourcit avec plus de lenteur. On en pourra juger par la figure 139, qui montre des secousses de moins en moins brusques et de moins en moins vibrantes en même temps.

Une preuve plus directe peut être tirée de l'expérience suivante. On sait qu'une tige vibrante quelconque possède pour ses vibrations une fréquence déterminée, toujours la même, fréquence qui résulte de la

masse de la longueur et de l'élasticité de la tige. Or, si l'on vient à modifier ces conditions en raccourcissant la tige ou en changeant son poids, la fréquence des vibrations changera nécessairement. J'ai pu m'assurer qu'il en était ainsi pour les vibrations que présentent les graphiques musculaires, et qu'on peut, en changeant le poids ou la longueur du levier, obtenir pour un même muscle des graphiques dont les vibrations varient d'amplitude et de fréquence. Il faut donc n'attacher aucune signification à l'existence ou à l'absence de ces petites ondulations du tracé qui se trouvent surtout dans la période d'ascension.

En vous prévenant de ces causes d'erreur dans la production des graphiques musculaires, j'ai voulu, messieurs, pousser aussi loin que possible la rigueur et la précision, mais je me hâte de vous dire que l'influence de ces causes d'erreur est très minime, et qu'en pratique on peut les négliger sans inconvénient, ainsi que vous le verrez bientôt.

3 *Des conditions qui modifient la forme de la secousse musculaire.*

Enregistrées au moment où le muscle est fraîchement préparé, les secousses présentent une grande brièveté, Elles prennent une durée de plus en plus grande à mesure que le muscle se fatigue par des secousses successives. L'expérience suivante va vous montrer la transition graduelle d'une forme à une autre pour une succession de secousses. Je vais recueillir sur un même cylindre les graphiques d'une centaine de secousses musculaires provoquées à intervalles réguliers et commençant toutes à un même moment de la rotation du cylindre. Vous voyez la disposition de l'expérience. Le cylindre qui reçoit le tracé tourne autour d'un axe horizontal. Son diamètre est de 14 cm, sa vitesse de rotation est indiquée par les ondulations que trace un diapason de 100 vibrations doubles par seconde. (Le cylindre fait un tour en une seconde et demie.) À côté du cylindre et dans un plan parallèle à son axe est un petit

chemin de fer qui porte sur un chariot une tige verticale. C'est sur cette tige qu'est placé le myographe dont le levier, horizontalement dirigé, vient reposer par sa pointe sur la surface enfumée du cylindre. Or, pendant que le cylindre tourne, le chariot s'avance et, avec lui, le levier du myographe qu'il porte. De la combinaison du mouvement circulaire du cylindre et du mouvement rectiligne du chariot résulte une hélice dont le pas est d'autant plus serré pour une même vitesse de rotation du cylindre que le chariot se meut plus lentement.

Un excentrique est disposé sur l'un des fonds du cylindre, de telle sorte qu'à chaque tour un courant électrique se produira et se rompra. De là deux excitations élastiques transmises au muscle à chaque tour du cylindre. Chaque mouvement imprimé par le muscle au levier enregistreur viendra interrompre la régularité de l'hélice en produisant le graphique d'une secousse ; et comme ces secousses sont produites à un même moment de la rotation du cylindre, elles commencent toutes verticalement les unes au-dessus des autres.

Si j'étale sur un plan (fig.139) le graphique que je

viens d'obtenir, nous y voyons deux séries verticales de secousses musculaires : l'une en 0 correspond aux excitations produites par les courants induits d'ouverture, et l'autre en C représente les secousses provoquées par les courants induits de clôture. Ces deux séries se ressemblent entre elles d'une manière par faite.

La ligne tracée au bas de la figure par un diapason de 100 vibrations doubles permet d'apprécier la durée absolue de chacune des secousses. Enfin vous savez que ces graphiques ayant pour abscisses les tours d'une hélice ascendante, c'est en bas de la figure que se trouvent les secousses fournies par le muscle frais, tandis qu'en haut elles correspondent à un certain degré d'épuisement du muscle.

On peut tirer de l'examen de ces graphiques les conclusions suivantes. Sous l'influence de la fatigue, trois modifications surviennent dans le graphique.

1° La durée des secousses augmente ;

2° La période d'ascension (raccourcissement du muscle) s'allonge notablement ;

3° L'amplitude de la secousse s'accroît également. (Mais cet accroissement n'est que passager. Si j'avais continué l'expérience plus longtemps, vous eussiez vu cette amplitude décroître et la secousse s'éteindre peu à peu, perdant graduellement de son intensité tout en continuant à augmenter en durée.)

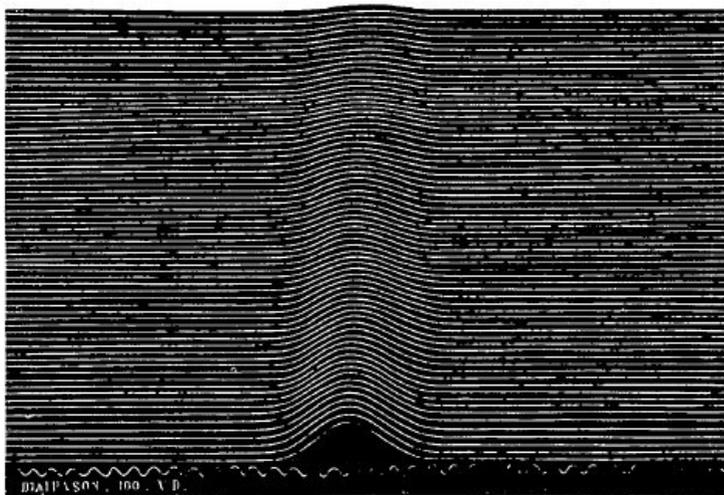


FIG. 140.

Pour justifier l'expression de fatigue musculaire que j'ai employée tout à l'heure, et pour prouver que ce n'est pas à l'altération du nerf par les excitations successives qu'est due la modification qu'éprouve la secousse, je vais agir sur le muscle lui-même. Pour cela

j'applique la pince myographique sur les muscles de la cuisse d'un lapin qui vient d'être tué, et j'obtiens le graphique représenté figure 140.

C'est toujours de bas en haut que se lisent les graphiques successifs, du commencement et de la fin de l'expérience. On voit très bien ici les changements produits par la fatigue et l'extinction graduelle de la secousse musculaire. – Le courant induit de rupture produit seul une secousse dans le muscle.

Mais, pendant la vie, ces phénomènes d'épuisement ne se produisent pas ; ils sont en tout cas bien moins énergiques. La pince myographique, appliquée sur moi aux muscles de l'éminence thénar, fournit un graphique régulier et dans lequel les secousses sont très peu modifiées par la fatigue, ce qui tient à ce que, pendant la vie, il se fait une réparation continuelle.

Plusieurs influences modifient la forme du graphique de la secousse musculaire : ainsi, lorsque l'épuisement du muscle a amené la modification caractéristique qui a été signalée plus haut, il suffit de

soumettre ce muscle à une température plus élevée pour obtenir, pendant quelques Instants ; le graphique du muscle non épuisé.

6 De la contraction dans les muscles de la vie animale.

Vous connaissez les conditions dans lesquelles se produit la secousse musculaire ; vous savez aussi sous quelles influences cette secousse se modifie dans son intensité, sa forme et sa durée. Nous allons chercher aujourd'hui comment des secousses successives se fusionnent entre elles au point de disparaître et de faire place à cet état du muscle auquel on a donné le nom de contraction. C'est ainsi que des chocs successifs, lorsqu'ils se suivent à courts intervalles, nous donnent une sensation nouvelle : celle d'un son continu.

La méthode graphique va nous fournir le moyen de saisir la manière dont se produit la contraction musculaire.

Fusion partielle de secousses musculaires successives. – Observons ce qui se passe lorsqu'on

enregistre des secousses séparées d'abord par un certain intervalle, et ensuite de plus en plus rapprochées.

Si chacune des secousses successives a le temps de s'effectuer en entier, on peut être sûr que les graphiques seront formés de secousses égales entre elles et dont les maxima et les minima seront sur des droites parallèles.

Mais si une première secousse n'a pas eu le temps de s'effectuer au moment où il s'en produit une seconde, la période de descente de la première courbe est interrompue par une ascension nouvelle, et cette dernière secousse, s'ajoutant en partie à la première, aura son maximum sur une ligne plus élevée. S'il n'y a que deux secousses, le sommet de la seconde sera d'autant plus élevé que le début de cette seconde secousse se fait plus près du sommet de la première.

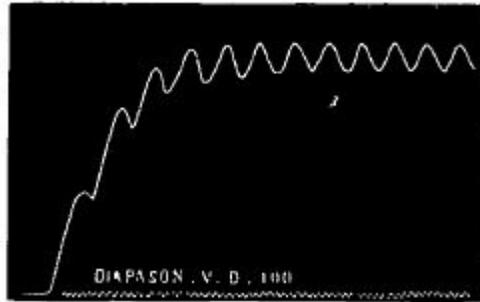


Fig. 228.

Si nous nous servons pour exciter le muscle d'une machine d'induction munie d'un interrupteur automatique, nous pourrons provoquer des excitations à intervalles réguliers plus ou moins courts. Voici ce qui se produit alors (fig. 228) :

Au début de l'excitation électrique, les secousses s'ajoutent ; comme on le voit dans la figure 228. Chaque secousse nouvelle s'élève d'autant moins haut que le niveau général du tracé est plus élevé, tandis que la période de descente des secousses va toujours en augmentant, jusqu'à ce qu'enfin ces deux périodes deviennent égales et qu'il s'établisse un régime régulier dans lequel les vibrations s'effectuent entre des maxima et des minima constants.

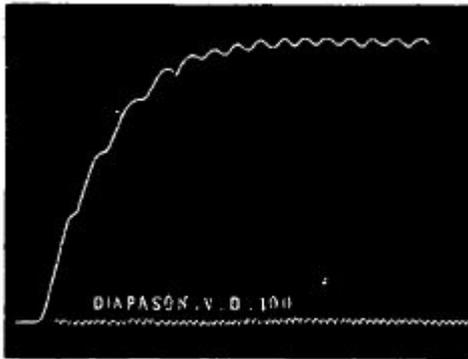


Fig. 229.

Si les secousses sont plus fréquentes, le même phénomène se produit ; seulement les secousses s'ajoutant entre elles d'une manière plus complète, le tracé, dans son ensemble, s'élèvera d'une manière plus brusque, et l'uniformité des secousses s'obtiendra à un niveau plus élevé. Ce fait ressort de l'inspection de la figure 229.

Comment doit-on expliquer ces phénomènes ?

Il faut d'abord considérer les forces qui président à la formation de chacune des secousses musculaires. Ceci nous conduit naturellement à admettre l'existence de deux forces antagonistes : l'une, la contraction, qui raccourcit le muscle, et l'autre, l'élasticité, antagoniste de

la première, qui tend à ramener le muscle à sa longueur normale. La contractilité agit pendant la période de raccourcissement en luttant contre l'élasticité qui subsiste seule pour ramener le muscle à ses dimensions normales, Telle est la conception la plus simple et la plus rationnelle, par conséquent, pour expliquer la production alternative de ces deux phénomènes opposés : raccourcissement du muscle et retour de celui-ci à ses dimensions primitives.

Admettons maintenant que la force contractile agisse à chacune des excitations électriques avec une même intensité. Il est bien certain que, d'autre part, la force élastique antagoniste augmentera à mesure que le muscle se raccourcira davantage ; c'est-à-dire qu'un même effort raccourcira d'au tant moins le muscle que celui-ci sera plus contracté. Ainsi s'expliquerait déjà la décroissance progressive des périodes ascendantes des secousses.

Mais l'augmentation graduelle de la force élastique du muscle explique également bien l'augmentation de la période de descente des secousses

successives, l'intensité de l'effet devant croître avec l'énergie de la cause. Ces deux mouvements inverses, dont l'un décroît à mesure que l'autre s'accroît, doivent nécessairement arriver à être égaux entre eux. Et, dès que cette égalité est atteinte, il n'y a pas de raison pour qu'elle disparaisse si les excitations électriques gardent leur fréquence et leur intensité. En effet, l'élasticité détruit à chaque instant l'effet produit par la force contractile.

Il existe, en physique et en physiologie, un grand nombre d'exemples d'établissement d'un régime régulier d'oscillations sous l'influence de forces primitivement inégales, mais qui, variant en sens inverse l'une de l'autre, finissent par se compenser exactement. Je ne veux citer qu'un exemple, je l'emprunterai à la physiologie de la circulation du sang.

Lorsqu'on applique le sphygmographe sur une artère et que l'on arrête les battements du cœur, en galvanisant le pneumogastrique de l'animal (certains sujets présentent naturellement des intermittences des systoles cardiaques qui reproduisent ces conditions), on

voit après un arrêt passager du cœur que les battements artériels se reproduisent dans des conditions particulières, Les graphiques des pulsations s'ajoutent partiellement les uns aux autres, ce qui produit une ascension de la ligne d'ensemble du tracé. Bientôt cette ascension s'arrête et l'on voit s'établir un régime régulier dans les pulsations artérielles ; alors la tension dans ces vaisseaux oscille autour d'une moyenne constante ; l'afflux du sang poussé par le cœur et l'écoulement de ce sang à travers les capillaires se compensent exactement. À ce moment, l'élasticité des artères produit après chaque battement du cœur un resserrement du système artériel égal à la dilatation que lui fait subir chaque systole cardiaque. Ce mécanisme est identique avec celui par lequel s'établit pour les muscles l'uniformité des secousses. J'ai pu répéter les mêmes phénomènes au moyen d'appareils schématiques imitant les principales conditions de la circulation sanguine⁵ ; cette méthode synthétique permet de se rendre un compte exact des effets que l'analyse a fait découvrir, Or, en reproduisant ainsi les pulsations des

5 Voy. Physiologie médicale de la circulation du sang.

artères, j'ai pu m'assurer que si l'on augmente la fréquence des impulsions du liquide sans modifier la force de chacune d'elles, on obtient une élévation générale du niveau du tracé plus rapide et plus considérable, et qu'en même temps on voit diminuer l'amplitude de chacune des pulsations artérielles.

Vous voyez, messieurs, que l'analogie que je vous signalais tout à l'heure est complète de tous points. Il devait en être ainsi puisque, dans la circulation sanguine comme dans les actes musculaires que nous venons d'étudier, nous trouvons des efforts musculaires égaux et rythmés luttant contre une élasticité d'intensité croissante.

Fusion complète de secousses musculaires successives. Formation de la contraction permanente ou tétanos. – En voyant que l'intensité des secousses diminue à mesure que leur fréquence augmente, on peut prévoir que, si leur fréquence est assez considérable, les secousses disparaîtront tout à fait. Du reste, Helmholtz a constaté que des excitations électriques répétées trente-deux fois par seconde donnent naissance au tétanos,

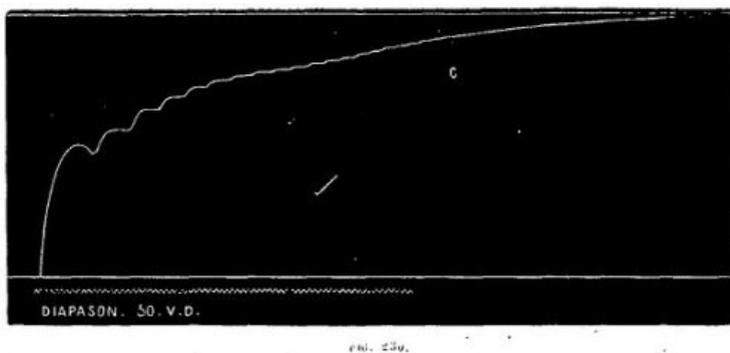
c'est-à-dire au raccourcissement permanent du muscle sans vibration appréciable.

Vous allez, messieurs, assister à cette production du tétanos et saisir par quel mécanisme elle se produit. Il s'agit de donner au muscle des excitations électriques de plus en plus fréquentes. Voici le mécanisme que j'ai employé pour obtenir ce résultat.

Une sorte de machine d'Atwood met en mouvement un interrupteur mécanique ; elle lui communiquera donc ; en vertu des lois de la chute des corps, un mouvement uniforme ment accéléré. L'interrupteur est formé d'un cylindre isolant muni de contacts métalliques qui ferment et ouvrent alternativement le circuit de la pile. Une disposition spéciale permet de recueillir à chaque tour du cylindre soit le courant induit de clôture, soit celui de rupture. Je puis donc appliquer au nerf du muscle que j'explore des excitations électriques parfaitement identique entre elles ; je puis aussi leur donner une accélération aussi rapide que je veux en graduant les poids de la machine et en réglant ainsi la vitesse de leur chute.

Le muscle étant disposé sous le myographe et son nerf mis en rapport avec les pôles du courant in duit je fais marcher l'interrupteur et vous voyez se produire le graphique représenté figure 230. Les secousses s'ajoutent à peu près comme dans les expériences précédentes, mais leur succession devenant graduellement plus rapide, leur amplitude dé croit aussi plus rapide ment. Vous les voyez enfin disparaître complètement au point C. Alors la contraction est produite.

Quelle est la fréquence nécessaire pour obtenir la disparition des secousses ?



Je ne crois pas qu'on puisse avec Helmholtz évaluer à 32 vibrations le minimum nécessaire pour produire la téτανisation d'un muscle. En effet, dans le

graphique représenté figure 230, la contraction a été obtenue à un moment où la fréquence des secousses n'excédait pas 27 vibrations par seconde.

Il est vrai que le levier enregistreur pourrait être accusé de manquer de sensibilité et de ne pouvoir vibrer 32 fois en une seconde. Vous allez voir qu'il n'en est rien :

Je prends un diapason de 200 v.s. par seconde et je le fais vibrer. J'approche ce diapason de la membrane du premier tambour, de celle qui dans une pince myographique reçoit directement l'effet de la secousse musculaire. Au moment où le diapason est en contact avec la membrane, le levier du deuxième tambour enregistre des vibrations sur le cylindre. – Je compte maintenant ces vibrations ; il y en a exactement 200 par seconde. Vous voyez donc : que l'instrument n'a pu nous induire en erreur et qu'il a dû enregistrer exactement les vibrations musculaires tant que celles-ci ont existé ;

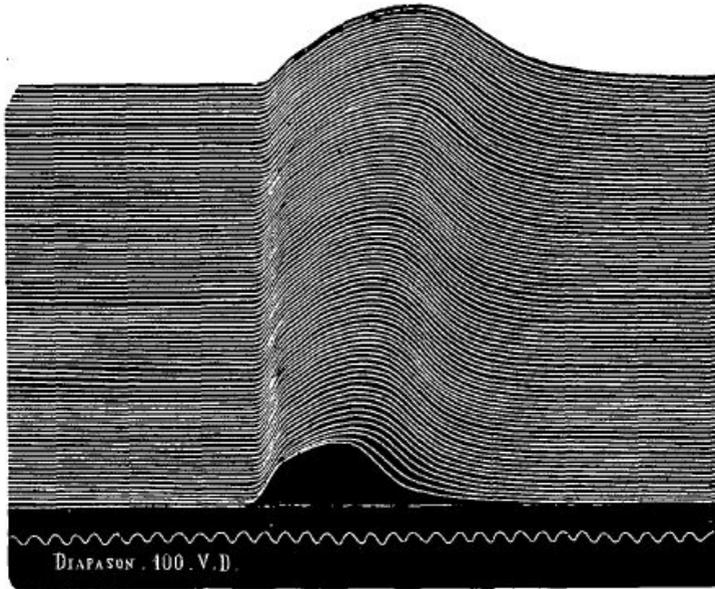


Fig. 231.

Vous allez voir maintenant que la contraction permanente peut être obtenue avec un nombre d'excitations bien moindre que celui que nous avons employé tout à l'heure.

Si l'on examine la figure 231 qui représente le graphique des secousses musculaires successives, on voit que sous l'influence d'excitations répétées la secousse prend une durée de plus en plus considérable. Il est bien évident que dans ces dernières conditions, la fusion des

secousses tendra à se faire beaucoup plus tôt que sur un muscle frais. Les expériences suivantes vont en donner la preuve.

Je prends le muscle que j'excitais tout à l'heure ; je le téτανise de nouveau afin de produire cet état que j'ai appelé la fatigue pour employer le langage ordinaire. Je soumets ce muscle fatigué à l'action de l'interrupteur à mouvement accéléré. Les excitations ont été les mêmes en intensité et en rythme que dans l'expérience précédente, mais le graphique est bien différent. On y voit la contraction se manifester presque dès le début du tracé, et l'on comprend parfaitement la manière dont ce téτανos s'est produit, lorsqu'on voit la plus grande durée des secousses et leur fusion plus complète au moment où le muscle a subi des excitations encore peu fréquentes. – Il ne paraît donc pas possible d'assigner un minimum à la fréquence des secousses qui téτανisent un muscle, puisque nous voyons ce minimum varier avec l'état du muscle, s'abaisser sous l'influence de la fatigue, s'élever dans des conditions contraires.

Bien que sur le vivant la modification de la

secousse par la fatigue soit peu sensible, ce qui tient sans doute à la réparation incessante que produit la nutrition, on peut encore saisir dans ces conditions une modification de la secousse par suite d'excitations répétées.

J'applique une pince myographique sur les muscles de mon pouce et j'excite ces muscles par un courant induit dont l'interrupteur est réglé de manière à donner 15 secousses par seconde. Ces secousses s'enregistrent sur un cylindre tournant en hélice. Vous voyez qu'elles sont très nettes en commençant, mais peu à peu leur sommet devient moins aigu ; elles se fusionnent entre elles d'une manière plus complète. Les voici enfin qui disparaissent à peu près entièrement. La contraction tétanique est obtenue ici par 15 excitations à la seconde.

Lorsqu'on augmente la force du courant induit exciteur, on arrive plus vite à la suppression des secousses. Je ne saurais vous dire à quel chiffre on peut ainsi abaisser le nombre des excitations nécessaires pour produire la contraction ; car l'intensité du courant que

j'emploie en ce moment m'est déjà très difficile à supporter.

Enfin, suivant le muscle qu'on choisit pour étudier la production du tétanos on obtient des résultats très différents ; nous verrons, en effet, que la secousse offre des caractères très différents dans les différents muscles d'un même animal. Il ne sera pas moins curieux de rechercher les caractères de la secousse et les conditions de la contraction sur des muscles empruntés à des animaux de différentes crasses.

Des différences d'intensité de la contraction musculaire. Nous avons vu tout à l'heure la manière dont s'établit la contraction musculaire, mais vous avez pu remarquer à l'inspection de la ligure 231 que la contraction ne se maintient pas à un état constant, mais qu'elle s'élève sans cesse à mesure que les excitations électriques prennent de la fréquence sous l'influence de l'interrupteur accéléré. – Les choses ne se passent pas ainsi lorsque l'interrupteur donne des excitations d'une fréquence constante. Il se produit alors un état permanent dans la contraction, état assimilable de tout point au

régime régulier qui s'établit dans les secousses quand celles-ci sont encore perceptibles. Bien plus sous l'influence de la fatigue musculaire, le tétanos tend à faiblir sans cesse ainsi que Valentin l'a très bien déterminé, de sorte que la ligne tracée par le myographe s'abaisse toujours et finit par retomber au niveau de l'abscisse, c'est-à-dire au zéro. À ce moment, le muscle est totalement épuisé. – Pourquoi donc avons-nous un accroissement constant de l'intensité de la contraction sous l'influence d'excitation de plus en plus rapide ? C'est apparemment parce que l'intensité de la contraction est, toutes choses égales, en raison de la fréquence des secousses qui la produisent.

De ce que, dans nos graphiques, les secousses musculaires cessent d'être apparentes à un moment donné, il ne s'ensuit pas qu'elles n'existent plus ; en effet, Helmholtz a parfaitement constaté que le son musculaire devient de plus en plus aigu pendant le tétanos si les excitations électriques sont de plus en plus fréquentes. Il faut donc conclure que dans le muscle contracté, il se produit des secousses que l'oreille nous

révèle, mais qui échappent à nos yeux et même aux appareils plus sensibles que nous employons pour les percevoir. Or, ces secousses invisibles ne doivent-elles pas s'ajouter entre elles absolument comme celles qui nous sont perceptibles ? N'est-il pas naturel que la courbe s'élève continuellement pendant la contraction comme pendant l'état transitoire qui l'a précédée ?

Du reste on sait depuis longtemps que la même machine d'induction provoque dans un muscle des contractions d'autant plus fortes que l'interrupteur est réglé de manière à vibrer d'un mouvement plus rapide. L'emploi de l'interrupteur accéléré nous montre plus clairement encore cette influence de la fréquence des excitations, puisqu'il nous permet d'assister à toutes les phases de l'accroissement d'intensité du tétanos.

Reste à savoir si cet accroissement dans la fréquence des secousses musculaires est la condition qui fait varier physiologiquement l'intensité de la contraction dans les différents actes de la fonction de motricité. Il est très possible que l'intensité de l'excitation que le nerf porte au muscle varie suivant l'énergie de la contraction

qui se produit, mais il est aussi très possible qu'il existe des variations dans la fréquence de secousses qui constituent la contraction physiologique.

L'auscultation, dont Helmholtz nous a indiqué la valeur pour apprécier le nombre des vibrations musculaires, peut seule donner la solution de cette question si délicate.

J'ai essayé d'ausculter un muscle pendant que j'exécutais avec celui-ci des contractions d'énergie croissante ou décroissante. J'espérais ainsi entendre suivant le cas un son musculaire d'une tonalité plus ou moins élevée. Mais je n'ai rien obtenu de bien net par ce procédé. Vous savez déjà combien il est difficile d'apprécier la tonalité d'un son aussi grave que celui du muscle qui se contracte, la difficulté s'accroît encore dans cette expérience par suite des frottements du muscle contre le pavillon de l'oreille, ou contre le stéthoscope si l'on se sert de cet intermédiaire. Il fallait donc supprimer tous ces bruits étrangers.

J'ai recouru au moyen que recommande

Helmholtz pour apprécier la tonalité du son musculaire dans le tétanos produit par les excitations électriques. On ferme avec de la cire ses conduits auditifs externes et l'on perçoit alors le son des muscles masséters tétanisés .. J'ai donc écouté dans ces conditions le son produit par les masséters volontairement contractés, j'ai cru remarqué que la tonalité de ce son s'élevait ou s'abaissait suivant que je rapprochais les mâchoires avec plus ou moins de force. J'évalue à une quinte l'intervalle des tons correspondants aux degrés extrêmes d'intensité de la contraction que je produisais ainsi volontairement.

7 Limite de fréquence des excitations électriques qui provoquent la contraction des muscles volontaires

Nous avons vu jusqu'ici l'intensité de la contraction musculaire croître avec la fréquence des excitations électriques qui la provoquent. Il est pourtant, dans certains cas, une limite au-delà de laquelle l'augmentation de fréquence des excitations électriques, bien loin d'augmenter l'intensité de la contraction, la fait diminuer et même disparaître. — Répétant un jour l'expérience qui a fourni le graphique 1, et qui consiste à provoquer la contraction d'un muscle par des excitations de fréquence accélérée, je me servis d'un poids plus lourd que de coutume. Je m'attendais à éprouver une sensation beaucoup plus forte et à observer une contraction beaucoup plus énergique. J'observai, à ma

grande surprise, que la sensation douloureuse que j'éprouvai d'abord faiblissait rapidement pour disparaître tout à fait, et qu'en même temps le levier de l'enregistreur de la contraction musculaire indiquait un affaiblissement progressif et une cessation complète de cette contraction. J'accusai d'abord l'appareil de quelque erreur et je supposai que les contacts cessaient de se produire avec une rotation trop rapide de la machine, mais je reconnus bientôt qu'il fallait chercher une autre cause à ce phénomène. Déjà Masson avait observé que les excitations électriques obtenues avec la machine de Pixii ne semblaient pas agir également bien sur les muscles des animaux lorsqu'on accélérât beaucoup les interruptions de courant. Un chat sur lequel ce physicien faisait ces expériences poussait des cris lorsqu'on tournait lentement la machine, semblait se clamer lorsqu'on accélérât la rotation et donnait de nouveau des signes de vives douleurs l'on ralentissait le mouvement.

La conclusion de Masson fut qu'une condition physiologique particulière devait être la cause de ces singuliers effets, et qu'à chaque excitation électrique il

fallait un certain temps pour que le muscle eut le temps de réagir.

Dans ces dernières années, M. Guillemin, à qui l'on doit de beaux travaux sur l'état variable des courants électriques, observa les mêmes phénomènes. Mais il remarqua de plus que la présence du fer doux dans la bobine inductrice modifiait l'état des courants induits et en prolongeait beaucoup la durée. Or, comme les courants induits qui se prolongent à la clôture et à la rupture d'un courant inducteur sont de sens inverse l'un par rapport à l'autre, il s'ensuit que ces deux courants, s'ils se produisent trop près l'un de l'autre, se neutralisent en partie. C'est ainsi que leur effet décroît sous l'influence d'un mouvement trop rapide de l'appareil interrupteur. Cette dernière interprétation, entièrement basée sur les lois de la physique, me semble être la seule vraie ; vous allez voir qu'elle est susceptible d'une démonstration très claire par l'emploi de la méthode graphique.

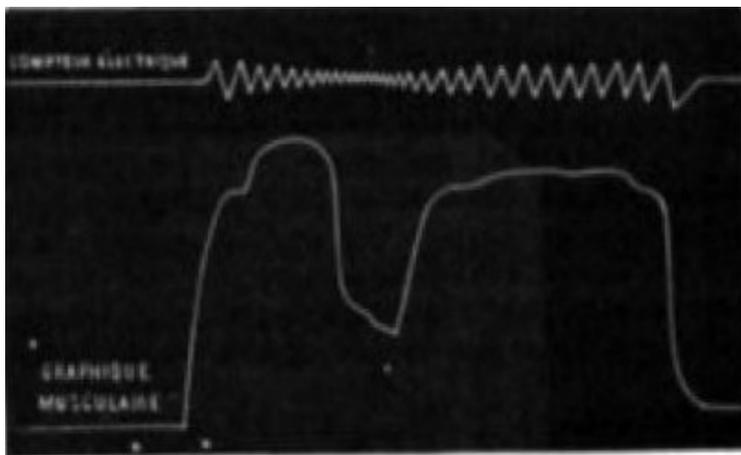


Fig. 844.

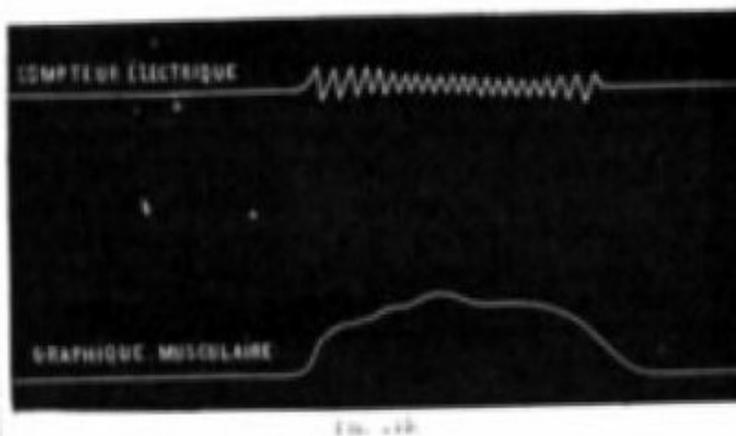


Fig. 845.

Un interrupteur mécanique est fixé sur le bord de la table, une manivelle permet de lui imprimer une rotation plus ou moins rapide à volonté. D'autre part, un compteur enregistrant trace sur le cylindre au moyen

d'un levier, des vibrations dont chacune correspond à 24 excitations électriques. Un autre levier enregistre en même temps le mouvement musculaire que je recueille sur moi-même au moyen de la pince myographique.

Première expérience. — J'emploie comme excitant les courants induits et je laisse le fer doux enfoncé dans la bobine. — Je tourne la manivelle lentement, puis plus vite, enfin avec une grande rapidité — Le graphique (fig. 244) nous montre à partir d'un certain moment, que plus la fréquence des excitations s'accroît, plus l'intensité de la contraction diminue. On voit la courbe musculaire tomber très bas au moment où la vitesse est à son maximum. À cet instant, le nombre des courants induits est d'environ 240 par seconde.

Deuxième expérience. — J'enlève les fers doux de la bobine et j'opère comme tout à l'heure. La contraction musculaire augmente d'intensité à mesure que je tourne plus rapidement la manivelle ; elle semble rester stationnaire, sauf quelques légères variations ; mais on ne la voit pas décroître, quelle que soit la vitesse de rotation de l'appareil (fig. 245).

Troisième expérience. – J'emploie comme excitant l'extracourant de la bobine inductrice, et je laisse le fer doux dans cette bobine. Lorsque la manivelle tourne lentement les secousses musculaires sont très énergiques ; la douleur très violente. Je tourne plus vite, la contraction se produit et la douleur diminue déjà. Je tourne encore plus vite, toute douleur cesse, la contraction faiblit et disparaît presque entièrement. Tout s'est donc passé comme dans l'expérience représentée dans la figure 244.

Si j'enlève le fer doux, l'extra-courant ne produit plus aucune action sur mes muscles.

De ces expériences il résulte : 1° que pour les courants induits et les extra-courants du circuit de pile, la présence du fer dans la bobine diminue les effets physiologiques, lorsque la fréquence des excitations électriques dépasse une certaine limite.

2° Que l'absence du fer doux supprimant cet effet, il faut rejeter l'hypothèse d'une condition physiologique, qui ne permettrait pas aux muscles ou aux

nerfs de subir plus d'un certain nombre d'excitations par secondes.

3° Enfin, que la théorie de M. Guillemin rend compte de tous les faits qui viennent de se produire dans les expériences précédentes ; elle est donc entièrement satisfaisante.

1 Des difficultés que présente la fonction dans les différents muscles des animaux

Jusqu'ici, messieurs, nous n'avons étudié que les différences qui surviennent dans l'acte musculaire, suivant la nature de l'excitation portée sur les nerfs ou les muscles. Nous allons voir maintenant comment réagissent les différents ordres de muscles sous l'influence d'excitations semblables entre elles.

Des différences nombreuses vont nous frapper, non-seulement suivant l'espèce animale, sur laquelle nous explorerons l'acte musculaire, mais aussi suivant

que chez un même animal nous observerons tel ou tel muscle.

Sur la grenouille, par exemple, les différents muscles de la vie de relation ne m'ont pas paru présenter la même forme de secousse, pour des excitations identiques ; il est vrai que le degré d'épuisement d'un muscle modifie beaucoup les caractères de sa secousse, et que sur un animal récemment sacrifié tous les muscles ne s'altèrent pas également vite, de sorte que leurs fonctions cessent bientôt d'être comparables. Cependant, en me plaçant dans les meilleures conditions, j'ai cru remarquer que certains muscles volontaires ont normalement une secousse beaucoup plus brève que certains autres. Ainsi, le gastrocnémien m'a paru avoir une secousse sensiblement plus brève que celle des muscles de la langue, mais ces expériences auront besoin d'être reprises.

Si l'on quitte les muscles de la vie de relation pour observer ceux de la vie organique, on trouve des différences tellement tranchées qu'elles vous frappent au premier abord. Je n'ai pas encore réussi à obtenir un

graphique bien net des muscles intestinaux, mais le cœur se prête très bien aux expériences ; j'ai donc pu les répéter un grand nombre de fois.

Caractères graphiques de la systole du cœur. – Étudiée sur le vivant, la systole du cœur est un acte complexe, dans lequel l'action musculaire se mélange à des mouvements passifs communiqués par le liquide sanguin aux valvules et aux parois de l'organe. Suivant l'état de la fonction, suivant l'espèce animale sur laquelle on l'observe, le graphique du cœur peut offrir les caractères les plus différents. Mais l'acte musculaire lui-même présente chez tous les animaux une uniformité frappante lorsqu'il est dégagé d'influences étrangères.

Pour cela, il faut empêcher la fonction circulatoire de s'effectuer. Le moyen le plus simple est de détacher entièrement le cœur d'un animal et de le placer sous le levier enregistreur. Le muscle cardiaque se contracte ainsi à vide et se trouve placé dans des conditions semblables à celles des muscles volontaires que nous avons étudiés précédemment.

Si nous appliquons au cœur d'une tortue les excitations fréquentes d'une bobine d'induction, nous voyons que le cœur au lieu de se tétaniser comme le ferait un muscle volontaire, continue à fournir ses systoles régulières, peut-être un peu plus fréquentes que si l'on n'excitait pas l'organe, mais enfin tout à fait indépendantes du nombre des excitations électriques qui lui sont appliquées.

Au point de vue de sa forme graphique, chaque systole du cœur rappelle parfaitement une secousse musculaire unique avec cette différence que la secousse du muscle volontaire est beaucoup plus brève comme nous l'avons vu.

Enfin, si l'on observe une série de systoles successives, on voit que ces mouvements changent de durée et d'amplitude, absolument comme le font les secousses d'un muscle de la vie animale sous l'influence de l'épuisement. Les systoles prennent plus de durée, perdent de leur amplitude et finissent par s'éteindre tout à fait. Une systole, observée à un moment donné, présente une durée que l'on peut prévoir : elle sera fatalement un

peu plus longue que la systole qui l'a précédée, un peu plus courte que celle qui la suivra. De sorte que si l'on superposait les graphiques de systoles successives, on aurait une figure tout à fait comparable à celle que nous a donnée la superposition de secousses successives.

Tant de ressemblances entre la systole du cœur et la secousse d'un muscle m'ont fait supposer que la systole n'est pas une contraction proprement dite, c'est-à-dire cet état complexe qui résulte de la fusion de secousses multiples, mais qu'elle est constituée par une secousse unique du muscle cardiaque, La grande durée de la systole ne constitue entre celle-ci et la secousse des muscles volontaires qu'une différence tout à fait accessoire. – Mais à quel contrôle pouvais-je soumettre cette prévision ?- Voici le moyen détourné qui me paraît avoir résolu cette difficulté.

Des phénomènes d'induction employés comme moyen d'analyser un acte musculaire. – Nous avons déjà parlé (p. 333) des phénomènes découverts par Matteucci et désignés par lui sous le nom de contraction induite. Vous savez qu'ils consistent en ceci. Lorsqu'une patte

galvanoscopique de grenouille est mise en rapport avec une autre patte semblable, de telle sorte que le nerf de la seconde repose sur le muscle de la première ; si cette première patte vient à se contracter, la seconde se contracte pareillement. Dans ce cas, les changements électriques qui surviennent dans le premier muscle au moment où il se contracte, exercent sur le nerf qui le touche une action inductrice qui provoque la contraction du muscle auquel ce nerf se rend.

En recueillant le graphique du mouvement qui se produit dans les deux muscles, l'inducteur et l'induit, j'ai pu constater les faits suivants :

1° Une secousse unique de la patte inductrice n'amène jamais qu'une secousse dans la patte induite.

2° Le téτανos ou contraction de la première patte induit la contraction dans la seconde.

3° La patte induite n'emprunte pas à l'inductrice le caractère de son mouvement. – Ainsi, en prenant comme inductrice une patte de grenouille épuisée, et par conséquent lente à se mouvoir, on induira dans une patte

fraîche les secousses brèves qui appartiennent au muscle non épuisé.

Ces premiers faits m'ont paru fournir un nouveau moyen d'analyser l'acte musculaire. En effet, si un mouvement, quelque prolongé qu'il puisse être, n'induit dans une patte de grenouille qu'une secousse unique, c'est probablement qu'il ne consiste lui-même qu'en une secousse musculaire. Or, c'est ce qui se passe lorsqu'on applique la systole du cœur comme inductrice sur une patte galvanoscopique,

Secousse induite par la systole du cœur dans une patte de grenouille. – Je place le nerf d'une patte galvanoscopique sur le cœur d'une grenouille, et nous voyons que chacune des systoles cardiaques induit dans la patte une secousse unique, très brève, environ quinze fois plus courte que la systole du cœur qui l'avait provoquée. Il paraît donc naturel de conclure que la systole du cœur n'est point assimilable aux contractions proprement dites, c'est-à-dire à ces efforts soutenus que produisent les muscles volontaires en fusionnant une série de secousses. La systole du cœur semble au

contraire correspondre à la secousse du muscle cardiaque. Ainsi s'explique l'analogie de sa forme avec celle de la secousse d'un muscle en général ; la transformation que la fatigue fait éprouver à la systole cardiaque comme à une secousse musculaire, etc. Cette nouvelle manière de comprendre les mouvements du cœur conduira peut-être à mieux comprendre aussi différents phénomènes qui se relient à l'acte musculaire de cet organe.

2 Des variétés de forme que présente le mouvement dans les muscles volontaires de différentes espèces animales.

Lorsqu'on écoute le son que produit en vibrant l'aile de certains insectes, on perçoit une tonalité extrêmement aiguë, et l'on a pu en conclure que l'aile de ces insectes exécute en une seconde plus de mille mouvements. Or, puisque d'autre part la secousse la plus

brève qu'on puisse provoquer dans les muscles de la grenouille semble durer environ six à huit centièmes de seconde, puisque le nombre maximum des secousses perceptibles qu'on peut provoquer dans ces muscles n'excède guère trente par seconde, il est évident que les caractères du mouvement varient dans les diverses espèces animales.

Une belle étude de physiologie comparée serait à entreprendre : elle consisterait à déterminer les caractères et la durée du mouvement qui se produit dans les muscles d'animaux de différentes espèces, sous l'influence d'excitations semblables.

Quelques expériences que j'ai entreprises à ce sujet m'ont donné déjà des résultats intéressants. Elles m'ont montré qu'une excitation électrique produit dans les muscles volontaires de différents animaux des mouvements bien différents.

La Tortue terrestre, dont la marche est si lente, présente, dans les caractères de sa secousse musculaire, une lenteur extrême. Si l'on applique la pince

myographique à la patte d'une tortue et qu'on électrise ce membre, la secousse unique qui s'ensuit dure autant que la systole du ventricule d'une grenouille. Voilà donc un muscle volontaire dont l'action se l'approche tout à fait de celle des muscles de la vie organique. Ce fait me semble d'autant plus important qu'il supprime la dernière dissemblance qui restait encore entre une systole ventriculaire et la secousse d'un muscle de la vie animale.

Chez les Crustacés, la secousse est assez longue également ; c'est surtout la période de retour du muscle à sa longueur normale qui est prolongée. En somme, sur l'écrevisse, j'ai trouvé des secousses d'environ une demi-seconde de durée.

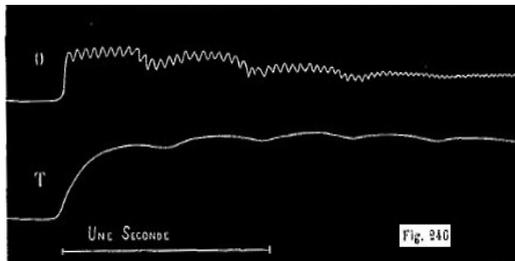
Les muscles des poissons ont, au contraire, une secousse extrêmement rapide. La durée de ce mouvement serait même chez eux moindre que chez les mammifères. Sur une Tanche j'ai obtenu des graphiques dont la durée n'excédait pas deux centièmes de seconde.

Enfin, chez les oiseaux, la secousse est tellement

brève que j'ai pu obtenir jusqu'à 75 secousses par seconde sans arriver au tétanos ; si je me suis arrêté à cette limite, c'est que l'interrupteur électrique dont je disposais ne pouvait donner des vibrations plus rapides.

Il serait intéressant de rapprocher les uns des autres les graphiques musculaires fournis par différentes espèces animales et de les réunir dans un tableau synoptique.

Je me borne à représenter (fig. 240) les graphiques obtenus sur l'oiseau O⁶, et sur la tortue T, dans deux expériences comparatives. On voit dans ces graphiques que la patte de la tortue est presque tétanisée avec deux secousses par seconde, tandis que l'oiseau en reçoit un nombre bien plus considérable sans arriver au tétanos.



- 6 Les grandes ondulations que produit le graphique musculaire de l'oiseau sont produites par les mouvements respiratoires ; la pince myographique était appliquée sur les muscles pectoraux.