

et il a trouvé que le courant est d'autant plus intense que le muscle est destiné à exercer une action mécanique plus grande, que cette action soit volontaire ou involontaire. Ainsi les faisceaux du cœur qui ne sont pas soumis à l'empire de la volonté manifestent un courant énergique comme les muscles destinés à la vie de relation qui sont tous faits pour obéir à la volonté, tandis que les faisceaux musculaires des intestins montrent un courant très-faible comme n'ayant à exercer que de faibles actions mécaniques. M. Matteucci avait démontré le premier la puissance électromotrice des muscles du cœur, en opérant avec une pile de cœurs de pigeons coupés transversalement. M. Dubois-Reymond a opéré sur des cœurs isolés de grenouilles, de cochons de mer et de souris domestiques, et il a observé que leur section artificielle est négative par rapport à leur surface extérieure. Des cœurs intacts produisent aussi de forts courants, et l'extrémité du cœur représente alors la section transversale.

L'existence du courant musculaire une fois bien constatée, on peut se demander quelle en est la cause; est-il le résultat indirect de l'action chimique qui accompagne la respiration, est-il une conséquence plus immédiate de l'organisme vivant? Nous reviendrons plus loin sur cette question délicate, quand nous aurons étudié les diverses causes qui peuvent exercer de l'influence sur le courant musculaire. Mais quelle que soit l'origine de ce courant, on peut chercher à savoir le rapport qui existe entre sa puissance et celle des courants produits par les sources ordinaires de l'électricité dynamique. C'est cette question que M. J. Regnaud a tenté de résoudre en comparant la force électromotrice d'un muscle à celle d'un couple thermo-électrique bismuth et cuivre (avec différence de 0° à 100°) pris pour unité. En opérant avec des précautions convenables¹ sur le muscle gastrocnémien de la grenouille, il a trouvé que le

¹ Entre autres précautions, M. J. Regnaud emploie, afin d'éviter les polarités secondaires, pour fermer le circuit, une dissolution concentrée de sulfate de zinc avec des électrodes en zinc, au lieu d'une dissolution de sel ordinaire avec des lames de platine.

maximum de la force électromotrice était compris entre 5 et 4 unités thermo-électriques. Le faisceau des muscles de la cuisse de grenouille qui a servi constamment de couple à M. Matteucci dans sa pile musculaire présente une valeur plus considérable; sa force électromotrice est comprise entre 9 et 10 unités. Ces nombres sont indépendants de la taille de l'animal, mais varient dans le même animal d'un muscle à l'autre. Cette différence se manifeste également dans les animaux à sang chaud. Ainsi en prenant sur un lapin trois muscles différents préparés très-rapidement, M. J. Regnaud a trouvé pour la force électromotrice 7 à 6 unités pour le muscle gastrocnémien, 11 à 10 avec le jambier, et seulement 6 à 5 avec le biceps. Il a confirmé numériquement le fait déjà signalé, qu'il faut plus de temps, pour tomber au même degré d'affaiblissement, à la force électromotrice du muscle de l'animal à sang froid qu'à celle du muscle d'un mammifère.

§ 5. Théorie du courant musculaire; influence sur l'intensité de ce courant de diverses causes et en particulier de la contraction. — Contraction induite, soit secondaire.

A la suite d'un très-grand nombre d'expériences aussi délicates que difficiles, M. Dubois-Reymond a réussi à démontrer que l'élément électromoteur est, dans le muscle, chaque fibre élémentaire; il est parvenu en effet, avec la dextérité qui le distingue, à obtenir, au moyen d'un simple faisceau élémentaire disposé de manière à mettre en communication par les coussinets de l'appareil, la section transversale et la section longitudinale, un courant de 8 à 10°. Ce point établi, quelle disposition faut-il supposer aux parties constitutives, c'est-à-dire aux molécules organiques du faisceau élémentaire pour expliquer les effets observés? Pour en avoir une idée, M. Dubois-Reymond estime qu'on peut se faire une image grossière il est vrai, mais cependant assez ressemblante du faisceau élémentaire, en l'assimilant à un cylindre de cuivre recouvert sur sa surface courbe d'une couche de zinc, ses deux bases restant de cuivre pur. Ce cylindre, plongé dans une solution conductrice, donnera nais-

sance à une quantité de courants qui partiront des différents points de la surface de zinc pour aboutir à ceux des deux bases de cuivre; maintenant, en établissant une communication au moyen d'un corps conducteur entre un point de la surface longitudinale de zinc et un point de la surface transversale de cuivre, on aura un courant dérivé tout à fait analogue à ceux qu'on obtient en faisant communiquer la section longitudinale et la section transversale d'un muscle. On peut même expliquer comment on obtient un courant en touchant deux points non symétriques de la même section; car il est facile de voir que, même avec le cylindre métallique dont il vient d'être question, les courants qui circulent des différents points de la surface de zinc à ceux des surfaces de cuivre des bases, ne sont pas tous égaux, et qu'on peut déterminer les courbes iso-électriques ou d'égale tension électrique. Dès lors, avec le cylindre comme avec le muscle, on pourra obtenir des signes de courant beaucoup plus faibles il est vrai que dans le cas fondamental, en touchant des points de la même surface qui ne correspondent pas aux points d'une courbe iso-électrique.

Chaque fragment isolé, soit chaque fibre élémentaire d'un muscle, peut donc être assimilé au cylindre dont nous venons de parler, et les courants qu'il nous fournit ne sont, comme ceux du cylindre, que des courants dérivés, par conséquent beaucoup plus faibles que les courants qui circulent réellement à travers la matière conductrice dont il est composé. Pour expliquer maintenant cet état électrique, il faut admettre que chaque molécule organique dont se compose le faisceau musculaire est électrique naturellement, et qu'elle possède les deux électricités à l'état libre. M. Dubois-Reymond estime que ces molécules dont la forme peut être quelconque, mais qu'il suppose être sphériques, ont chacune une zone équatoriale positive et deux zones polaires négatives; il suppose de plus qu'elles sont disposées de façon que les diamètres qui passent par les pôles négatifs de chacune sont parallèles entre eux et à l'axe du faisceau musculaire; il nomme ces molécules *péri-polaires*. Nous sommes disposés à croire, tout en adoptant l'analogie au point de vue électrique du faisceau musculaire

avec le cylindre de cuivre recouvert de zinc dans sa surface courbe, qu'on peut très-bien l'expliquer en admettant que les molécules organiques n'ont que deux pôles électriques, l'un positif, l'autre négatif, hypothèse que nous avons déjà énoncée pour les molécules inorganiques; mais seulement nous sommes conduits à supposer, comme M. Dubois-Reymond, au reste, est obligé de le faire pour expliquer les phénomènes électriques du muscle, que, par l'effet de la vie, ces molécules affectent une disposition particulière. Elles ne se disposent point, en effet, comme dans une substance inorganique abandonnée à elle-même, de manière qu'il s'établisse un équilibre électrique par l'effet de la neutralisation mutuelle de toutes les électricités moléculaires, mais de façon que dans chaque tranche transversale du faisceau musculaire les pôles positifs des molécules soient tournés en dehors et les pôles négatifs en dedans. Les électricités positive et négative des molécules de chaque tranche, qui rayonnent du centre à la circonférence, se neutralisent, sauf la positive de celles qui sont à la circonférence et la négative de celles qui sont au centre. Mais ces deux électricités libres se réunissent par la surface extérieure du muscle en formant des courants parfaitement semblables à ceux qui s'établissent sur la surface humide qui recouvre le cylindre cuivre-zinc, et dont nous ne percevons non plus qu'une portion dérivée dans les expériences où nous faisons communiquer entre elles les sections transversale et longitudinale d'un muscle, ou deux points non symétriques de la même section¹. Telle serait donc la disposition des molécules dans chaque faisceau musculaire élémentaire, d'où résulterait naturellement un état électrique

¹ La disposition que nous supposons être imprimée par l'effet du principe vital aux molécules qui constituent la fibre musculaire, nous paraîtrait se concilier d'une manière remarquable avec la supposition que nous avons faite (t. I, p. 570), que l'état électrique polaire est dû à un mouvement de rotation primitif que possède chaque atome de la matière autour d'un axé dont les deux pôles sont, l'un le positif, l'autre le négatif. On comprendrait en effet que le principe vital agirait en obligeant les molécules qui constituent une fibre, à se disposer de façon que leur mouvement de rotation s'accomplisse pour toutes dans le même sens autour de l'axe du faisceau.

négalif à tous les points des deux bases ou extrémités du faisceau musculaire complet, et un état positif à tous les points de la surface longitudinale. L'état électrique des sections artificielles, soit transversales, soit longitudinales, serait évidemment aussi la conséquence de la même distribution des particules. Nous verrons dans l'instant que l'hypothèse que nous venons d'énoncer sur le mode d'arrangement des molécules organiques dans la fibre musculaire, trouve une confirmation remarquable dans les phénomènes qui résultent de l'action des diverses causes qui modifient le courant musculaire.

Ainsi donc, quelle que soit la manière dont on envisage la disposition et le rôle des molécules organiques dans la fibre musculaire, on peut conclure d'une manière presque certaine de l'étude que nous avons faite, que l'état électrique des muscles est celui d'un circuit fermé, et que le courant qu'on perçoit, soit par le galvanomètre, soit par la grenouille galvanoscopique, n'est qu'un courant dérivé dont l'intensité est bien plus faible que celle du courant musculaire principal.

Du reste, l'analogie que nous avons établie entre le muscle et une chaîne électrique trouve une confirmation dans le fait observé par M. Dubois-Reymond, que la force électromotrice des muscles s'accroît avec leur largeur et leur épaisseur. Il n'a pas trouvé que l'extension ou la compression d'un muscle exerçassent une influence bien sensible sur le courant musculaire, et il attribue la petite diminution qu'il a quelquefois observée comme étant exercée par ces actions sur l'intensité de ce courant, à l'altération qu'elles font éprouver à la force vitale du muscle.

C'est un point, en effet, très-important à signaler que le décroissement qu'éprouve le courant musculaire, à partir de la mort de l'animal ou du moment où le muscle a été détaché de son corps. M. Matteucci avait observé que ce décroissement est d'autant plus rapide que l'animal occupe un rang plus élevé dans l'échelle des êtres; M. Dubois-Reymond attribue cette différence à ce que les animaux à sang chaud, les mammifères et les oiseaux, perdent leur irritabilité musculaire après la

mort, beaucoup plus vite que les poissons et les reptiles. Or, suivant lui, la diminution dans l'intensité du courant musculaire après la mort est proportionnelle au degré d'excitabilité du muscle; et la force électromotrice, aussi bien que cette excitabilité, ont pour terme la rigueur cadavérique, qui provient, ainsi que Brooke l'a démontré, de la coagulation de la fibrine contenue dans les muscles en dehors des vaisseaux sanguins. Il résulte donc de là que le phénomène du courant musculaire doit être considéré comme un phénomène qui ne peut avoir lieu que dans un tissu organique vivant, et qui, une fois qu'il a disparu par la rigidité cadavérique, ne peut se reproduire, lors même que cette rigidité a cessé, et que par conséquent l'état de décomposition a commencé: preuve de plus que la force électromotrice musculaire est bien dépendante de la disposition que la force vitale imprime aux molécules organiques dans la structure du muscle, disposition qui dure encore quelque temps après la mort de l'animal autant que l'irritabilité, mais qui disparaît dès que, la décomposition commençant, les particules n'obéissent plus qu'aux forces qui régissent la matière inorganique.

Mais de toutes les causes qui peuvent exercer de l'influence sur le courant musculaire, la plus importante sans contredit est la contraction du muscle lui-même, contraction qu'on détermine par l'irritation nerveuse, c'est-à-dire en imprimant à un nerf moteur par des moyens physiques, mécaniques ou chimiques, cet état particulier qui se traduit par la contraction du muscle. De tous ces moyens le plus efficace est la transmission d'un courant électrique à travers le nerf, transmission qui peut même produire le tétanos, c'est-à-dire une contraction continue, en ayant lieu elle-même par une suite d'oscillations ou d'intervalles successifs très-rapprochés les uns des autres; c'est ce que nous avons déjà vu dans la quatrième partie de ce Traité¹. Mais l'emploi d'un courant électrique pour déterminer la contraction musculaire exige bien des précautions, quand on veut étudier l'influence de cette contraction sur le courant mus-

¹ Tome II, pages 450 et suivantes.

culaire lui-même, car il faut éviter avec grand soin l'influence exercée directement sur ce courant par l'électricité employée seulement comme moyen d'avoir la contraction. C'est sous ce rapport que la méthode dont s'est servi M. Dubois-Reymond nous paraît éminemment propre à donner des résultats à l'abri de toute objection.

On place un muscle gastrocnémien de la grenouille (fig. 339) sur les coussinets ordinaires de façon que son nerf vienne repo-

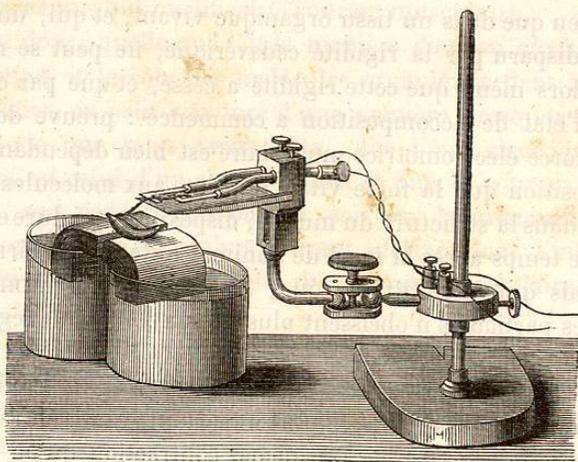


Fig. 339.

ser sur deux petites lames de platine qu'elles réunissent comme un pont et qui, recourbées à angle droit, sont soudées par une de leurs extrémités chacune à une tige de laiton ; ces tiges traversent à frottement juste une pièce d'ivoire qui sert à les isoler et à les fixer en même temps, et elles sont susceptibles d'être mises en mouvement, de façon qu'on puisse disposer les lames suivant les besoins de l'expérience et en particulier comme elles sont disposées dans la figure. Des fils conducteurs communiquant avec les tiges permettent de mettre la portion du nerf comprise entre les deux lames de platine dans le circuit d'un courant électrique d'une nature quelconque. Une petite plaque de verre sur laquelle reposent les lames de platine sert à préve-

nir tout contact possible entre les lames et le muscle gastrocnémien.

Le courant dont M. Dubois-Reymond fit usage dans les expériences dont il s'agit était un courant d'induction produit dans un des fils d'une bobine en faisant passer par intermittence dans l'autre fil le courant d'un couple de Grove très-faiblement chargé. Le passage de ces courants induits à travers la portion du nerf comprise entre les deux lames de platine détermine dans le muscle une contraction tétanique qui est accompagnée d'un changement subit dans la direction du courant musculaire, puis d'une oscillation de l'aiguille qui ne peut se fixer à une position d'équilibre tant que dure l'état tétanique. Cet effet ne tient nullement à une dérivation du courant transmis à travers le nerf, qui vient affecter le galvanomètre ; car, outre qu'il est impossible de comprendre cette dérivation dans la disposition de l'expérience, il est facile de s'assurer qu'on n'obtient point le même effet en remplaçant le nerf par un fil ou une bande de papier humectés, plus conducteurs que lui et qui, communiquant avec l'une des extrémités du muscle, sont placés de la même manière, c'est-à-dire comme un pont entre les deux lames de platine. Du reste, le phénomène qu'on observe quand on excite le nerf par le courant électrique se manifeste également, mais seulement d'une manière un peu moins prononcée quand on détermine le tétanos, soit en irritant le nerf par l'action chimique ou mécanique ou par la chaleur, soit en empoisonnant une grenouille par la strychnine.

L'effet que nous venons de signaler ne tient point, comme on pourrait le croire, à la production par la contraction tétanique, d'un courant contraire au courant musculaire naturel, mais simplement à un affaiblissement qui en résulte dans ce courant, affaiblissement qui permet au courant provenant des polarités secondaires de se manifester. Pour le prouver il n'y a qu'à ne pas fermer le circuit du galvanomètre qui accuse la présence du courant musculaire avant que le muscle ait été tétanisé, ce qui fait qu'on évite la production des polarités secondaires ; mais si on ferme ce circuit pendant que la contraction tétanique a lieu, alors on obtient un courant dirigé

dans le sens du courant musculaire, mais seulement beaucoup plus faible que lorsque le muscle n'est pas tétanisé. Cet affaiblissement ne provient, ainsi que Dubois-Reymond s'en est assuré par des expériences directes, ni d'une augmentation dans la résistance à la conductibilité, ni d'un défaut de contact avec les coussinets, qui résulterait pour le muscle de son état de tétanisation.

On peut, au lieu d'employer le galvanomètre multiplicateur, se servir, pour apprécier l'influence de la contraction sur le courant musculaire, de la grenouille galvanoscopique. Il est facile même de faire usage des deux espèces de galvanomètres en même temps, en disposant l'expérience comme l'indique la figure 340 dans laquelle U représente la roue destinée à rendre discontinu le courant primaire J produit par le couple ZP pen-

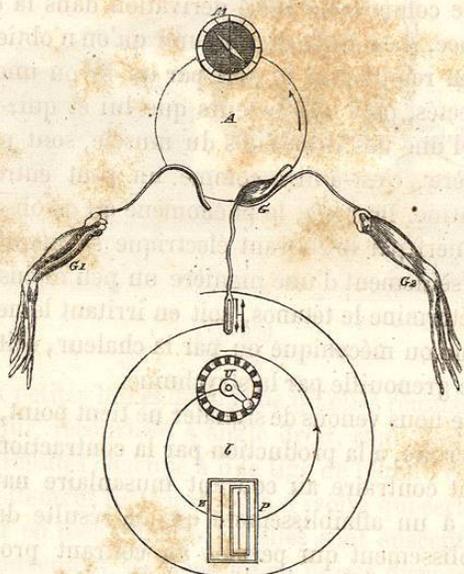


Fig. 340.

dañt que le courant induit vient passer à travers le nerf du muscle gastrocnémien G, dont le courant est transmis à travers une portion du nerf d'une grenouille galvanoscopique G₁, et à travers le galvanomètre M. Mais si on veut se passer du galva-

nomètre, on peut appliquer directement sur le muscle gastrocnémien G le nerf de la grenouille galvanoscopique G₂; ce dernier mode d'opérer a été indiqué pour la première fois par M. Matteucci dans la production du phénomène désigné sous le nom de *contraction induite*. Dans le premier mode on voit à la fois la cuisse de la grenouille galvanoscopique se contracter tétaniquement pendant tout le temps que le muscle gastrocnémien est lui-même tétanisé, et le galvanomètre marcher comme dans l'expérience précédente, mais avec moins de force, parce que l'interposition du nerf diminue la conductibilité du circuit. Mais il faut, pour que cette contraction de la grenouille galvanoscopique ait lieu, que le muscle gastrocnémien soit disposé sur les coussinets de manière à donner naissance au courant musculaire ordinaire, c'est-à-dire de façon à ne pas reposer sur eux par des points symétriquement situés des sections longitudinale ou transversale; car dans le cas où ce muscle reposerait par des points symétriques et où par conséquent il n'y aurait pas de courant, sa tétanisation ne déterminerait point de contraction dans celui qui sert de galvanomètre.

Nous avons dit que le mode d'opérer, qui consiste à placer le nerf de la grenouille galvanoscopique en contact avec le muscle gastrocnémien, avait été découvert par M. Matteucci; voici comment il y avait été conduit par la production du phénomène décrit par lui sous le nom de *contraction induite*. Le savant physicien italien, après avoir préparé une grenouille à la manière ordinaire, posait sur les cuisses de cette grenouille, de façon à les unir comme par un pont, le filament nerveux de la grenouille galvanoscopique, en ayant soin que ce filament ne fût pas tendu; puis, faisant passer un courant voltaïque dans les nerfs lombaires de la première grenouille, il opérail une forte contraction dans les muscles de ses cuisses, mais en même temps il voyait se contracter la jambe galvanoscopique, dont le nerf seulement était en contact avec les cuisses de la grenouille en contraction. Cette expérience, répétée en posant le nerf de la grenouille galvanoscopique sur le muscle de la cuisse d'un lapin qu'on faisait également contracter au moyen d'un courant qui traversait son nerf, avait été variée de mille