

SIXIÈME PARTIE

ÉLECTRICITÉ

I

PRINCIPES GÉNÉRAUX DE L'ÉLECTRICITÉ

Les corps peuvent, comme on dit, être à l'état neutre, ne manifestant alors aucune propriété électrique; ils peuvent aussi être électrisés. Comme on le trouve dans les traités élémentaires, on sait qu'ils se classent alors en corps électrisés positivement et corps électrisés négativement. Quelle que soit l'idée que l'on puisse se faire sur la nature de l'électricité, on peut considérer que tout se passe comme si ces phénomènes électriques étaient dus à deux fluides différents : l'électricité positive et l'électricité négative. La première se développe sur une tige de verre frottée avec un morceau de drap, la seconde sur un bâton de résine frotté avec une peau de chat. L'une et l'autre électricité attirent les corps légers. Lorsque les corps sont conducteurs à leur surface ils se chargent, au contact du verre ou de la résine frottés, soit d'électricité positive, soit d'électricité négative. Une fois chargés, on constate qu'ils sont repoussés par les corps portant la même électricité qu'eux et au contraire vivement attirés par les corps portant de l'électricité d'espèce contraire.

Tout se passe comme si les corps à l'état neutre contenaient un fluide neutre décomposable en un fluide positif et en un fluide négatif. Ces deux fluides amenés au contact se combinent pour donner, s'ils sont en proportion égale, du fluide neutre. Chacun de ces fluides positif ou négatif repousse le fluide de même nom et attire le fluide de nom contraire; si un corps est chargé positivement il subit une attraction de toute charge négative et une répulsion de toute charge positive. C'est l'inverse quand il est chargé négativement.

Quand une charge A, positive ou négative (mettons positive, pour fixer les idées), se trouve au voisinage d'un corps conducteur B à l'état neutre, le fluide neutre de ce conducteur est décomposé *par influence*, l'électricité négative étant attirée au voisinage de A, le plus près possible. Il peut alors arriver deux choses. Si l'on

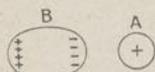


Fig. 436.

approche beaucoup le corps A de B fig. 436, la charge positive de A se combine avec le fluide négatif du voisinage avec production d'une étincelle et donne du fluide neutre. Après éloignement de A, B reste chargé de fluide positif. Ou bien si on met B en communicatif avec le sol, le fluide positif, repoussé le plus loin possible, s'écoule dans la terre et, après rupture de la communication, le conducteur reste chargé négativement.

Coulomb, qui a étudié avec grand soin les attractions et les répulsions électriques a montré que les forces en jeu répondent aux mêmes lois que celle de la gravitation, c'est-à-dire qu'elles sont proportionnelles aux quantités d'électricité et en raison inverse du carré de la distance.

Un grand nombre de phénomènes électriques peuvent s'interpréter avec cette hypothèse des deux fluides, elle est très commode pour la plupart des explications.

Quelle que soit l'idée que l'on se fasse des phénomènes électriques, on constate que l'électricité se propage d'une façon très différente à travers les corps suivant leur nature. Si l'on tient une tige de verre à la main on peut sans inconvénient introduire l'extrémité de cette tige dans une flamme de manière à en amener la fusion, on ne peut répéter la même expérience avec une tige de cuivre, rapidement on est obligé de l'abandonner par suite de la propagation de la chaleur jusqu'aux points où on la tient. Il en est de même en électricité : certaines substances sont, comme on dit, isolantes, c'est-à-dire que l'électricité ne se propage pas par leur intermédiaire, d'autres sont dites bonnes conductrices. En réalité il n'y a pas deux classes séparées de corps, les uns isolants, les autres conducteurs; tous les intermédiaires existent entre l'argent, qui paraît le plus favorable à la facile propagation de l'électricité, et la paraffine, qui semble s'y prêter le moins. Cette question sera d'ailleurs examinée de plus près. Il était nécessaire de rappeler ces principes généraux avant d'aller plus loin pour ne pas se heurter à chaque pas à des explications trop longues.

II

LOIS ET UNITÉS ÉLECTRIQUES

Pour bien saisir les lois et unités électriques nous nous servirons de comparaisons des phénomènes électriques avec divers autres phénomènes.

En premier lieu considérons un ballon communiquant avec l'atmosphère par un orifice O. Si le robinet R est librement ouvert, la pression de l'air à l'intérieur du vase est la même que celle de l'atmosphère. Nous pouvons diminuer et augmenter la pression dans le ballon; le poids de gaz qui y sera contenu sera proportionnel à la pression. D'un autre côté si nous faisons varier le volume du ballon, à pression égale le poids du gaz contenu sera proportionnel au volume. De plus, bien entendu, ce poids dépendra de la nature du gaz, il pourra donc, dans tous les cas, se représenter par $P = KVp$, K étant un nombre dépendant de la nature du gaz, V étant le volume et p la pression.

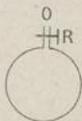


Fig. 437.

Prenons maintenant un corps que nous chaufferons. A mesure que la température montera, nous aurons fourni de plus en plus de chaleur. L'expérience montre que la quantité de chaleur absorbée par le corps est proportionnelle à l'augmentation de température, au volume du corps et à une constante dépendant de la nature de ce corps. Nous aurons donc, pour représenter cette quantité de chaleur, une formule analogue à la précédente, $Q = KVT$, Q étant l'augmentation de quantité de chaleur, et T l'augmentation de température.

Passons enfin à l'électricité. Portons une charge croissante sur un corps convenablement isolé : à mesure que le corps prend cette charge croissante, il augmente de ce que nous pourrions appeler la température électrique ou la pression électrique, et qui porte le nom de *potentiel*. Quand un corps est de plus en plus chaud, il rayonne de plus en plus vers les environs; quand un vase contient un gaz, les fuites sont d'autant plus importantes que la pression est plus élevée; de même plus un corps est à un potentiel élevé, plus les étincelles qu'on en tire sont grandes, plus il perd facilement par les supports. Nous trouvons encore pour l'augmentation de charge une formule analogue à la précédente, $Q = zCV$,

V étant l'augmentation de potentiel, C une constante nommée la capacité du corps. Dans le cas de la chaleur la capacité calorifique dépendait du volume V et d'une constante K variable avec la substance du corps, différente suivant que l'on avait affaire à du cuivre, du fer, de l'eau, etc. En électricité la capacité dépend d'autres éléments. La nature du corps n'a aucune influence sur elle, qu'il soit en cuivre ou en fer, cela revient au même pourvu qu'il soit conducteur et que l'électricité puisse se répandre sur lui. L'expérience prouve que cette capacité C dépend au contraire directement de la forme du corps et de sa position par rapport aux corps voisins. Prenons une masse de plomb, une sphère par exemple, isolée dans l'espace, elle aura une certaine capacité électrique. Déformons cette sphère, nous n'en changerons pas la masse, sa capacité calorifique restera la même, mais sa capacité électrique changera. Prenons maintenant cette masse de plomb et, sans rien y changer, approchons-la d'autres corps, ce seul déplacement modifiera encore sa capacité électrique, d'autant plus qu'on l'amènera plus près d'autres corps.

Quand nous avons considéré une masse de gaz enfermée dans un ballon nous avons parlé de sa *pression* et de son *poids*; pour la chaleur et l'électricité nous n'avons considéré que des *augmentations de température*, *augmentations de chaleur*, *de potentiel*, etc. Cela tient à ce que si nous pouvons réaliser pratiquement une pression nulle dans un vase contenant un poids zéro de gaz, nous n'usons généralement pas d'un zéro de température absolue, mais d'un zéro conventionnel à partir duquel nous comptons non des températures absolues, mais des augmentations de température et de même pour les autres grandeurs. Quand nous parlons d'une température de 5°, nous voulons dire une température de 5° plus élevée que celle de notre zéro conventionnel, tandis que lorsque nous parlons d'une pression de 5 cm. de mercure, cette mesure est absolue sans convention d'un zéro. Pour que le parallélisme soit parfait nous aurions pu supposer qu'à l'origine le ballon contienne une certaine quantité de gaz et n'envisager que les augmentations de poids variant proportionnellement aux augmentations de pression.

Nous sommes donc arrivés en somme à la première formule fondamentale $Q = zCV$ reliant entre elles les quantités d'électricité Q à la capacité du corps C et à son potentiel de charge V.

Lorsque l'on prend deux vases, deux ballons par exemple.

contenant un même gaz à une pression différente, et qu'on les met en communication par l'intermédiaire d'un tube, le gaz s'écoule du vase à plus haute pression vers le vase à plus basse pression. La quantité de gaz qui s'écoule dans un même temps est d'autant plus grande que la différence de pression est plus élevée. Mais il intervient un autre élément, c'est la résistance que le gaz rencontre au passage à travers le tube de communication. Il est bien évident que, toutes choses égales d'ailleurs, la quantité de gaz qui s'écoulera sera d'autant moindre dans le même temps que le calibre du tube est plus réduit.

De même quand on établit une différence de température aux deux extrémités d'une tige de métal, la chaleur se propage du côté le plus chaud vers le côté le plus froid. Cette propagation est d'autant plus importante que la différence de température est plus élevée. Pour une même différence de température la quantité de chaleur qui passe varie avec la communication; il en passe moins à travers un fil fin et long qu'à travers un fil gros et court. On peut dire que la chaleur rencontre une certaine résistance à sa propagation, ou que le conducteur offre une certaine résistance au passage de la chaleur.

Dans la propagation de l'électricité c'est encore le même fait que l'on rencontre. Mettons en communication par un fil deux conducteurs à potentiel différent, l'électricité s'écoulera du corps à potentiel le plus élevé vers le corps à potentiel le plus bas. La quantité d'électricité qui s'écoule par seconde, que nous désignerons par I , est proportionnelle à la différence de potentiel entre les deux corps et en raison inverse de la résistance R du circuit. C'est ce qui est exprimé par la formule $I = \beta \frac{V}{R}$, dite formule d'Ohm.

I représentant la quantité d'électricité qui passe par seconde, est désigné généralement sous le nom d'intensité du courant.

Si l'écoulement est uniforme on en déduit immédiatement que dans le nombre de secondes t , la quantité qui passe est représentée par la formule $Q = \gamma It$.

Enfin il y a une quatrième formule extrêmement importante. Quand un conducteur est traversé par un courant électrique il s'échauffe, ce fait est aujourd'hui de notion trop courante pour qu'il y ait lieu d'y insister. La chaleur dégagée dans un fil est, comme nous le savons, équivalente à une certaine quantité d'énergie. L'expérience a prouvé que cette chaleur dégagée, et l'énergie

équivalente, croissent proportionnellement à la résistance du fil et au carré de l'intensité I , c'est-à-dire qu'en représentant cette énergie par W , on a $W = \varepsilon RI^2$. C'est la loi de Joule.

Nous avons donc les quatre formules suivantes fondamentales :

$$(1) \quad Q = \alpha CV$$

$$(2) \quad I = \beta \frac{V}{R}$$

$$(3) \quad Q = \gamma It$$

$$(4) \quad W = \varepsilon RI^2$$

qui contiennent six espèces de grandeurs : des quantités d'électricité Q , des capacités électriques C , des différences de potentiel V , des résistances électriques R , des intensités de courant électrique I , des énergies électriques W .

Pour mesurer toutes ces quantités il a fallu choisir des unités. Ces unités auraient pu être prises arbitrairement, mais alors, comme nous l'avons montré à propos des mesures en général, les formules auraient conservé les facteurs constants α , β , γ , ε . Au contraire, par un choix judicieux, dans le détail duquel nous ne pouvons entrer ici, ces coefficients ont disparu comme on a fait disparaître les coefficients dans les mesures de surface, de volume, etc.

Ces formules sont alors devenues :

$$(5) \quad \left\{ \begin{array}{l} Q = CV \\ I = \frac{V}{R} \\ Q = It \\ W = RI^2 \end{array} \right.$$

C'est sous cette forme qu'elles sont employées en électricité.

Voici les unités qui ont amené la disparition des coefficients.

Unité de résistance. — L'unité de résistance nommée Ohm est la résistance d'une colonne de mercure à 0° ayant un millimètre carré de section et environ 1 m. 06 de long.

Unité de différence de potentiel. — Cette unité se nomme le Volt. Pour en donner une idée nous dirons qu'il y a 1 v. 08 de différence de potentiel entre les deux pôles d'une pile Daniell.

Unité d'intensité. — L'unité d'intensité est l'Ampère, c'est l'intensité du courant qui se produit dans un circuit dont la résis-

lance est un ohm, sous une différence de potentiel de un volt aux extrémités du circuit.

Unité de quantité. — C'est le Coulomb; elle représente la quantité d'électricité passant en une seconde en un point d'un circuit parcouru par un courant de un ampère.

Unité de capacité. — C'est le Farad, ou capacité du corps dont le potentiel croit de un volt pour une augmentation de charge de un coulomb.

Unité de puissance. — C'est le Watt ou quantité d'énergie dépensée par seconde dans un circuit ayant un ohm de résistance et parcouru par un courant de un ampère.

Il est extrêmement important, comme on le conçoit, dans l'application des formules (3), d'exprimer les grandeurs électriques au moyen des unités que nous venons de définir; à cette condition seulement on obtient un résultat exact. Par exemple, si l'on prend la première de ces formules, en multipliant la capacité d'un corps exprimée en farads par son augmentation de potentiel exprimée en volts, on a son accroissement de charge en coulombs. De même pour les autres formules.

Toutefois il arrive ce qui se produit pour les autres mesures; les unités peuvent dans certaines circonstances être trop grandes ou trop petites. Dans la pratique le farad est généralement beaucoup trop considérable, on prend alors le micro-farad, unité un million de fois plus petite que le farad. Dès lors en multipliant les capacités ainsi mesurées par l'augmentation de potentiel, on a l'accroissement de charge mesuré en micro-coulombs, unité un million de fois plus petite que le coulomb. On se sert aussi souvent du megohm qui vaut un million d'ohms et du milliampère qui vaut un millième d'ampère. Les autres subdivisions ou multiples sont peu employées.

Souvent certaines de ces formules sont transformées. Ainsi si dans $W = RI^2$ on remplace I par sa valeur $I = \frac{V}{R}$, on en déduit

$$(6) \quad W = \frac{V^2}{R}$$

qui nous donne la puissance en fonction de la résistance et du voltage.

Si on n'avait remplacé qu'un seul de I par $\frac{V}{R}$ on aurait eu :

$$(7) \quad W = IV.$$

Cette dernière forme est d'un usage fréquent; pour avoir l'énergie dépensée par seconde dans un circuit, on mesure l'intensité du courant qui le parcourt, la différence de potentiel aux extrémités du circuit, et on multiplie l'un par l'autre.

Toutes ces considérations d'unités et de formules deviennent très simples après lecture attentive de ce qui suit, en particulier de ce qui concerne les mesures.

III

PRODUCTION DE L'ÉLECTRICITÉ

L'électricité peut être utilisée sous des formes très diverses; suivant les exigences de cette utilisation il faut avoir recours à des moyens de production très variés. Il peut arriver que l'on désire une petite quantité d'électricité à un très haut voltage, comme on peut avoir besoin d'une petite quantité de chaleur à très haute température, ou bien on peut avoir besoin d'un débit considérable continu, ou d'un courant alternatif, etc. Nous allons examiner successivement les divers dispositifs généraux que le médecin peut avoir à utiliser.

IV

MACHINES STATIQUES

Les anciennes machines à frottement ne sont plus employées aujourd'hui; même la machine dite à l'influence du type Holtz a été abandonnée. On ne trouve plus pour ainsi dire que les machines Wimshurst avec secteurs ou sans secteurs, c'est-à-dire portant ou non sur les plateaux en ébonite des pastilles recouvertes d'étain. Dans le cas des machines à secteurs (fig. 438) il suffit de mettre l'appareil en marche pour que, s'il est en bon état, il se mette à fonctionner. Dans les types sans secteurs (fig. 439) il faut un amorçage préliminaire, lequel se fait du reste très sim-

plement ; il suffit pour l'obtenir de toucher du doigt un des plateaux en un endroit déterminé.

Ces machines, dont il n'y a pas lieu ici de faire la description détaillée ni la théorie, ont besoin d'un entretien extrêmement minutieux. Elles fournissent de l'électricité à très haut potentiel pouvant atteindre et même dépasser 50 000 volts, mais elles ont un faible débit. Ce débit croît bien entendu avec la surface des

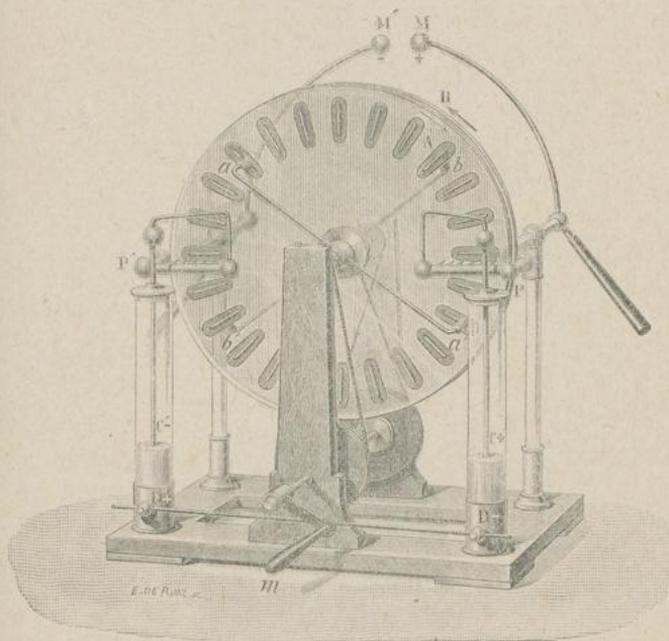


Fig. 439.

plateaux et leur nombre. On préfère en général augmenter le nombre des plateaux (fig. 440) plutôt que d'en faire croître la surface au-dessus d'une certaine limite correspondant à environ 50 à 60 cm. de diamètre. L'ébonite est en effet une substance se déformant assez facilement, les grands plateaux ne restent pas plans, ce qui compromet assez rapidement la bonne marche de l'appareil.

La machine de Wimshurst sert principalement quand on veut charger statiquement un corps à un haut potentiel, ce corps

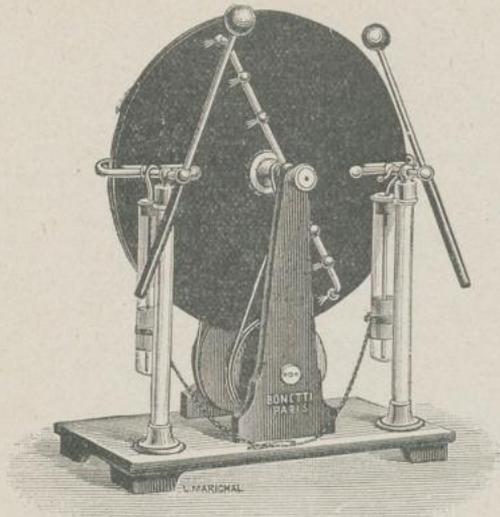


Fig. 439.

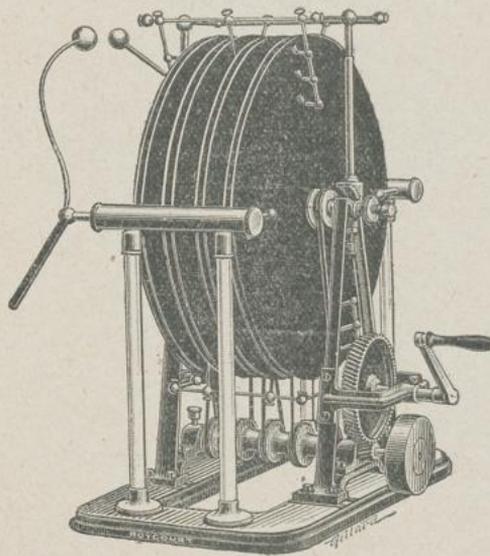


Fig. 440.

élan
mac
l'em
c'est

Av
cine,
quels
nous
de la

Si
sulfu
cuivr
tence
ce qu
se ch
positi
le zin
façon
positi

Vo
ceptio
pile. l
rence
charg
en éq
rait le
positiv
fil con
naison
cesse
parcou
zinc ju
cité da
potent

étant suffisamment bien isolé pour que le débit assez faible de la machine suffise à couvrir les pertes. Nous verrons qu'on a pu l'employer en radiologie pour produire des courants peu intenses, c'est-à-dire débitant une petite quantité d'électricité.

V

PILES

Avant d'entrer dans la description des piles employées en médecine, il est indispensable de rappeler certains principes sur lesquels reposent leur construction et leur emploi, sans toutefois nous attarder à de longues considérations théoriques sur l'origine de la production de l'électricité dans ces conditions.

Si l'on plonge dans l'eau acidulée par de l'acide sulfurique un morceau de zinc et un morceau de cuivre, on constate entre ces deux métaux l'existence d'une différence de potentiel, le zinc devient ce que l'on nomme le pôle négatif parce qu'il semble se charger négativement, le cuivre devient le pôle positif parce qu'il semble se charger positivement. Si l'on réunit le zinc au cuivre par un fil extérieur, ce fil est parcouru d'une façon constante par un courant allant, par définition, du pôle positif au pôle négatif.

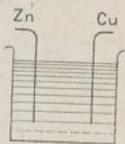


Fig. 441.

Voici comment nous pouvons nous figurer les choses; cette conception facilitera la compréhension de tout ce qui se passe dans la pile. Le zinc étant plongé dans le liquide, il se produit une différence de potentiel au contact de ce zinc et du liquide, le zinc se charge négativement et le liquide positivement. Le cuivre se met en équilibre avec le liquide, c'est un simple conducteur, on pourrait le remplacer par un charbon et on le fait souvent, il se charge positivement. Si maintenant on réunit le zinc au cuivre par un fil conducteur extérieur, il tend toujours à se faire une recombinaison à travers ce fil, pendant que la charge se renouvelle sans cesse au contact du zinc et du liquide. Le conducteur réellement parcouru par le courant se compose donc du liquide depuis le zinc jusqu'au cuivre, plus le fil extérieur, et l'écoulement d'électricité dans ce conducteur se fait sous l'influence d'une différence de potentiel se produisant entre le zinc et le liquide. La différence de

potentiel ainsi obtenue et grâce à laquelle se produira une circulation continue d'électricité porte souvent aussi le nom de *force électromotrice* de la pile. Il y a dès maintenant lieu de faire observer une chose extrêmement importante, c'est que la force électromotrice d'une pile dépend uniquement des corps qui entrent dans sa construction et nullement de sa forme ou de ses dimensions. L'élément que nous venons de décrire plus haut et qui est dû à Volta a toujours 0 volt 8 de force électromotrice. Cela ne veut pas dire que tous les éléments de Volta soient équivalents quelle que soit leur forme. En effet si nous cherchons l'intensité du courant obtenu dans certaines circonstances, nous savons que cette intensité sera déterminée par la formule $I = \frac{V}{R}$. V sera la différence de potentiel, toujours la même pour tous les éléments de Volta. R est la résistance du circuit parcouru par le courant. Le circuit comprend le fil extérieur, plus le liquide compris entre le zinc et le cuivre, or, suivant la forme de ce conducteur liquide, sa résistance sera très variable, et il en résultera une valeur très différente pour l'intensité du courant : plus cette résistance liquide sera faible, plus il sera possible d'obtenir un courant intense dans le circuit extérieur. Cette résistance du liquide est ce que l'on nomme la résistance intérieure de la pile. On conçoit qu'il y ait intérêt à avoir des éléments de pile à résistance intérieure faible et à force électromotrice élevée.

Pour diminuer la résistance intérieure des piles il faut rapprocher autant que possible le zinc de l'autre métal, afin de n'avoir qu'une faible couche de liquide à traverser. De plus il faut mettre en regard de grandes surfaces, de façon à donner au conducteur liquide une grande section. Cela conduit à prendre de grands éléments de pile.

Pour augmenter la force électromotrice, il faut convenablement choisir les substances dont la pile est composée ; suivant ces substances, nous aurons des résultats différents plus ou moins favorables. Mais il y a encore une autre considération qui doit nous guider dans la détermination des substances entrant dans la construction de la pile. Revenons à l'élément de Volta. Si l'on vient à monter un élément de cette espèce, on constate qu'au moment de sa mise en marche il donne un courant assez intense, mais très rapidement cette intensité tombe à une fraction parfois assez faible de sa valeur primitive. On dit que la pile s'est polarisée. Que

s'est-
décom
de laq
séque
ment.
cause
c'est p
tout a
agissa
polaris
Don
préocc
conver
En p
ne pas
second
force é
nous v
faudra
conven
intérieu
d'autre
être tra
elles re
Dans
négalif
plongé
évite ce
qui rev
la surfa
l'usure
d'autres
est du c
C'est su
sant des
liquide e
même li
un vase
bent de
pas le m

s'est-il passé? La production de courant est accompagnée d'une décomposition chimique du liquide de la pile, dans le mécanisme de laquelle on entrera plus loin avec quelques détails, et dont la conséquence est un dégagement d'hydrogène sur le cuivre de l'élément. On démontre que c'est ce dégagement d'hydrogène qui cause la polarisation de la pile, il faut donc chercher à l'éviter; c'est pour cela que l'on introduit dans le liquide de la pile, ou tout au moins autour du pôle positif, un corps oxydant, lequel, agissant sur l'hydrogène, le transforme en eau et empêche la polarisation de la pile.

Donc dans l'établissement d'un modèle de pile nous devons nous préoccuper de trois choses pour obtenir un courant d'intensité convenable et constant, pendant un certain temps au moins.

En premier lieu, nous devons choisir nos substances de façon à ne pas avoir de polarisation, ceci est absolument fondamental. En second lieu, nous devons chercher des substances donnant une force électromotrice aussi élevée que possible. Enfin, suivant que nous voudrions obtenir un courant plus ou moins intense, il nous faudra prendre des éléments plus ou moins grands et disposer convenablement les parties métalliques pour réduire la résistance intérieure. Bien entendu il y aura aussi lieu de tenir compte d'autres circonstances; par exemple si les piles sont destinées à être transportées elles devront être construites autrement que si elles restent à poste fixe.

Dans toutes les piles qui peuvent intéresser le médecin, le pôle négatif est du zinc. Si l'on se contente de zinc ordinaire, aussitôt plongé dans le liquide ce zinc s'attaque et s'use en pure perte. On évite cet inconvénient en prenant du zinc absolument pur, ou ce qui revient au même et est beaucoup moins cher, en amalgamant la surface du zinc. Dans ces conditions, pour certains éléments, l'usure est absolument nulle quand le circuit n'est pas fermé, pour d'autres elle est tout au moins extrêmement réduite. Le pôle positif est du cuivre, du charbon, parfois du platine ou un autre métal. C'est surtout le liquide qui varie, et plus encore le corps dépolarisant destiné à absorber l'hydrogène, et qui peut être dissout dans le liquide ou disposé autour du pôle positif à l'état solide, pâteux ou même liquide. Dans ce dernier cas il est en général maintenu dans un vase poreux entourant le pôle positif, dont les parois s'imbibent de liquide, laissent passer l'électricité, mais ne permettent pas le mélange rapide des liquides excitateurs et dépolarisants.

Nous allons maintenant examiner les principales piles pouvant servir au médecin.

Pile Daniell. — Elle n'est plus très usitée, mais pourrait encore rendre service en un endroit isolé où il faudrait monter ses éléments soi-même. Elle se compose d'un premier vase extérieur en grès ou en verre contenant un deuxième vase en terre poreuse. Entre les deux vases se trouve un cylindre en zinc amalgamé plongeant dans de l'eau acidulée par l'acide sulfurique au dixième. Le vase poreux contient un morceau de cuivre plongé dans une solution saturée de sulfate de cuivre.

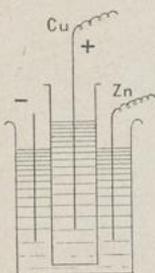


Fig. 442.

L'hydrogène, qui dans l'élément de Volta se dégageait sur le cuivre, décompose le sulfate de cuivre en acide sulfurique et cuivre qui se dépose sur le pôle positif.

L'élément ne change donc pas de constitution et donne un courant constant tant que la solution de sulfate de cuivre reste à un bon état de concentration. On obtient facilement ce résultat en introduisant dans le vase central des cristaux de sulfate de cuivre qui se dissolvent à mesure des besoins.

L'élément Daniell a une force électromotrice d'environ 1,06 à 1,08 volt suivant les conditions du montage. On peut remplacer l'eau acidulée par une solution de sulfate de zinc.

Pile de Poggendorff. — Dans ce modèle le sulfate de cuivre est remplacé par du bichromate de potasse; on n'a pas besoin de maintenir ce corps autour du pôle positif par un vase poreux, il suffit de le dissoudre dans l'eau acidulée, le cuivre est remplacé par un charbon de cornue. La solution acide de bichromate de potasse est très oxydante, il ne peut y avoir dégagement d'hydrogène et la polarisation est impossible. L'inconvénient de cette pile est que le zinc s'attaque même lorsque le circuit est ouvert, il faut donc avoir soin, quand elle n'est pas en service, de relever le zinc. La force électromotrice de l'élément Poggendorff dépasse un peu 2 volts, c'est le plus élevé que l'on possède. Comme il n'y a pas de vase poreux on peut réduire beaucoup l'épaisseur du liquide compris entre le zinc et le charbon et par conséquent construire facilement des éléments à faible résistance inférieure.

Ces deux conditions réunies, grande force électromotrice et faible résistance intérieure, font de cet élément une pile de choix pour produire les courants très intenses, en particulier pour alimenter les galvanocautères, lorsqu'on n'a pas à sa disposition d'autre procédés, tels que de faire une prise sur la distribution d'électricité d'une ville. Pour faire la solution excitatrice il est très important de mélanger d'abord l'acide sulfurique à l'eau, et de n'ajouter le bichromate qu'après refroidissement, faute de quoi le liquide est perdu.

Pile Leclanché. — La pile Leclanché comprend un zinc se trouvant au contact d'une solution de chlorhydrate d'ammoniaque; un aggloméré de charbon et de bioxyde de manganèse forme le pôle positif. L'hydrogène se déposant sur le pôle positif réduit le bioxyde de manganèse avec formation d'eau, il n'y a donc pas de polarisation. En réalité si on fait débiter à la pile un courant intense elle se polarise, mais elle revient à son état primitif si l'on cesse de faire passer le courant. Le grand avantage de cet élément est qu'il peut rester monté sans usure sensible quand il est en circuit ouvert; il est toujours prêt à servir, c'est donc la pile par excellence du

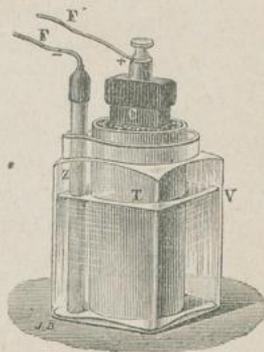


Fig. 443.

médecin. On peut remplacer le chlorhydrate d'ammoniaque par du chlorure de zinc, la pile prend alors le nom de pile Gaiffe. L'avantage de cette substitution est d'éviter les sels grimpants. Quand on place une solution de chlorhydrate d'ammoniaque dans un vase, on voit peu à peu monter sur la face interne du vase des cristaux de sel qui finissent par atteindre la partie supérieure et par déborder. Le liquide monte par capillarité entre la couche de sel et la paroi du vase et mouille peu à peu jusqu'au support sur lequel se trouve la pile. On évite cet inconvénient en paraffinant la partie supérieure du vase ou en remplaçant le chlorhydrate d'ammoniaque par du chlorure de zinc. Ce corps étant déliquescents ne cristallise pas et ne monte pas le long de la paroi du vase.

La force électromotrice du Leclanché est de 1,45 environ. Elle

est la pile de choix chaque fois que les éléments doivent rester montés en permanence, mais elle a une résistance intérieure trop grande pour permettre d'atteindre les très grandes intensités, elle se polariserait d'ailleurs dans ces conditions. C'est une très bonne pile pour les besoins courants de l'électrothérapie, car dans ces conditions on n'emploie jamais que de faibles intensités.

Pile au chlorure d'argent. — Dans cette pile le zinc n'est pas amalgamé, le pôle positif est une lame d'argent entourée de chlorure d'argent, le tout est plongé dans une solution de chlorhydrate d'ammoniaque ou de chlorure de sodium.

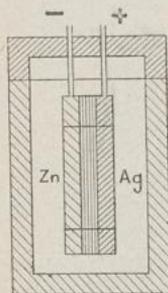


Fig. 444.

L'hydrogène qui se dégage au pôle positif agit sur le chlorure d'argent pour donner de l'acide chlorhydrique avec dépôt d'argent. On peut donner à cette pile un très petit volume et la rendre très transportable. Pour cela la lame de zinc plate est recouverte sur une de ses faces d'une couche de papier à filtre imbibée de la solution de chlorhydrate d'ammoniaque. Par-dessus se trouve la lame d'argent recouverte sur sa face interne de chlorure d'argent. Le contact est maintenu par deux petites bandes de caoutchouc, et, pour éviter l'évaporation, le tout est enfermé dans une boîte cylindrique en ébonite sur laquelle se visse un couvercle donnant passage aux deux pôles de la pile.

La force électromotrice de cette pile est de 1,02 volt seulement, mais elle se recommande par son petit volume. Elle est en particulier très avantageuse pour actionner les petites bobines d'induction portatives. Elle n'a qu'un inconvénient, il faut l'employer régulièrement : si elle reste trop longtemps hors de service elle finit par s'encroûter, il se forme sur le zinc une couche très résistante au passage de l'électricité qui nécessite un démontage et un grattage difficile à effectuer. Il est donc bon de l'employer sans but pendant quelques minutes. Si le papier à filtre se desséchait on dévisserait le couvercle, on plongerait pendant quelque temps la pile dans une solution de chlorhydrate d'ammoniaque ou de chlorure de sodium, et après l'avoir essuyée extérieurement on la remettrait en place.

Pile au bisulfate de mercure. — La pile au bisulfate de mercure est aussi très bonne pour obtenir le courant continu utilisé en médecine. Voici comment elle est généralement constituée. A un couvercle plat est fixé un cylindre creux en charbon de corne.

L'axe de ce cylindre est occupé par un bâton de zinc et le bout est plongé dans une solution de bisulfate de mercure. Dans le flacon contenant cette solution se trouve un bouchon de calibre un peu inférieur au flacon. Quand la pile est en place, le charbon appuyant sur le bouchon le fait plonger au fond du liquide dont le niveau s'élève.

Si la pile n'est pas en usage, au moment où on relève la pile le bouchon monte à la surface du liquide dont le niveau baisse. Dans ces conditions la pile se transporte facilement sans que le clapotis la fasse déborder, il suffit de ne pas trop l'incliner. Cette pile est peut-être la plus pratique dans le cas où l'on a besoin de transporter l'appareil. Elle fournit facilement sans polarisation les courants continus utilisés en électrothérapie. De plus quand la pile s'affaiblit on peut la remettre soi-même en état, souvent il n'y a qu'à changer le liquide et quand le zinc est usé on le remplace aisément à l'aide de pièces de rechange faciles à trouver dans le commerce.

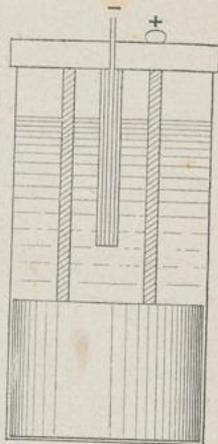


Fig. 445.

VI

ACCUMULATEURS

Aujourd'hui, de plus en plus on remplace les piles par des accumulateurs.

L'accumulateur consiste essentiellement (fig. 446) en deux lames de plomb A, B, plongeant dans une solution d'acide sulfurique de densité 1,16 à 1,26. Il faut maintenir cette densité en la vérifiant de temps en temps et ajoutant au besoin de l'eau distillée.

On charge l'accumulateur en mettant A en relation avec le pôle positif d'un générateur d'électricité et B avec le pôle négatif. Une fois chargé, l'accumulateur fonctionne comme une pile ayant un

pôle positif en A et un pôle négatif, en B, c'est-à-dire qu'il donne un courant de sens inverse du courant de charge. Quand l'accumulateur est déchargé, on le recharge à nouveau. Au début, Planté, qui inventa l'accumulateur, le fabriquait de la façon suivante :

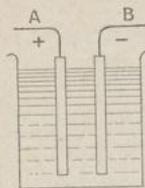


Fig. 446.

Deux feuilles de plomb étaient superposées en les maintenant séparées par un drap ou un feutre. On enroulait le tout en un cylindre que l'on plongeait dans un vase contenant l'eau acidulée. Une des feuilles formait le pôle positif, l'autre le pôle négatif. On conçoit que ces accumulateurs ayant une très grande surface d'électrodes très voisines l'une de l'autre, la résistance intérieure était très faible, aussi permettaient-ils de donner un courant

très intense. Mais ils exigeaient une formation assez longue, c'est-à-dire qu'au début de leur emploi, ils se chargeaient rapidement à refus et se déchargeaient très vite; peu à peu le plomb devenait de plus en plus poreux, surtout en alternant les charges, ce qui donnait lieu à des formations d'oxyde qui se réduisait dans la décharge et la charge inverse. L'accumulateur pouvait prendre des charges de plus en plus grandes. Aujourd'hui on supprime la période de formation en constituant les électrodes par des lames de plomb per-

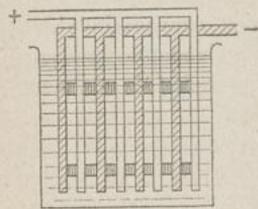


Fig. 447.

forées dont on garnit les orifices d'oxyde de plomb. On prend alors des vases à section carrée, on y introduit un nombre plus ou moins considérable de plaques perforées et l'on réunit en un pôle négatif toutes les plaques impaires par exemple, en un pôle positif toutes les plaques paires fig. 447. La séparation des électrodes est maintenue par des bouchons; on a ainsi une très grande surface utile.

La force électromotrice des accumulateurs est voisine de 2 volts, ils ont une résistance intérieure très faible et sont par conséquent très avantageux chaque fois que l'on désirera obtenir un courant très intense. Leur seul inconvénient est de nécessiter la charge préalable, ce qui exige une source de courant, par exemple la distribution d'une ville. Les accumulateurs sont généralement lourds et ne peuvent se transporter qu'avec peine; de plus ce transport nécessite certaines précautions pour éviter les débordements de liquide et les détériorations. Toutefois on fait aujourd'hui des

modèles parfaitement clos, relativement légers et pratiquement transportables.

Ces appareils demandent à être entretenus avec le plus grand soin, il faut surveiller la densité du liquide, ne jamais les décharger complètement et ne pas leur faire débiter ou prendre un courant supérieur à celui que vous indique le constructeur. Si l'on ne prend pas ces précautions, ils se détériorent rapidement.

VII

GROUPEMENT DES ÉLÉMENTS

Il arrive souvent qu'un élément de pile ne suffise pas à produire l'intensité du courant que l'on désire atteindre, il est alors nécessaire de grouper un certain nombre d'éléments, et, suivant la façon dont se fait ce groupement, on obtient des résultats très différents.

Le groupement dit en série s'obtient en reliant les éléments, à la suite les uns des autres, de façon que le pôle positif de l'un soit rattaché au pôle négatif du suivant, comme l'indique la figure 448 où chaque élément est représenté par deux traits parallèles, le grand étant le pôle positif; le courant circulera dans le circuit extérieur, de résistance R, dans le sens

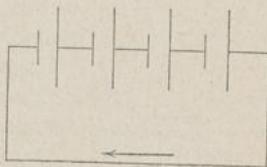


Fig. 448.

de la flèche. Ce courant sera obligé de traverser tous les éléments placés à la suite les uns des autres, comme il résulte de la simple inspection de la figure. Passant à travers tous les éléments il a à franchir la résistance de tous ces éléments; si la résistance de l'un d'entre eux est r et qu'il y en ait n , cela fera nr et en y ajoutant la résistance du circuit extérieur on aura en tout $nr + R$. Cherchons maintenant la force électromotrice qui fait circuler le courant, l'un des éléments ayant V . Faisons

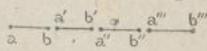


Fig. 449.

une comparaison avec la chaleur et supposons que nous plaçons bout à bout une série de corps $ab, a'b', a''b''$, etc., tels que dans chacun d'eux le côté b soit à une température supérieure au côté a d'un certain nombre de degrés t ; nous n'avons pas à nous préoccuper ici de la manière dont ce résultat pourrait être atteint. Le point b sera donc à t° au-dessus de a ; a' en contact avec b se

mettra en équilibre de température avec b , mais b' étant à t° au-dessus de a' sera alors à $2t^\circ$ degrés au-dessus de a'' . De même a'' se mettra en équilibre de température avec b' mais b'' sera à t° au-dessus de a'' , à $2t^\circ$ au-dessus de a'' et à $3t^\circ$ au-dessus de a ; et ainsi de suite, s'il y a n corps semblables le b du dernier sera à nt° au-dessus de a du premier.

Il en est de même pour les éléments de pile groupés en série, les forces électro-motrices des divers éléments s'ajoutent, et s'il y en a n , la force électromotrice de la chaîne sera nV . L'intensité du courant devra donc être donnée par la formule

$$I = \frac{nV}{nr + R}$$

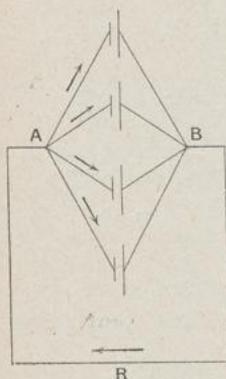


Fig. 450.

éléments, tout se passe comme s'il avait un débouché d'autant plus grand qu'il y a plus d'éléments, c'est-à-dire, s'il y a n éléments, la résistance que le courant rencontre en passant dans la pile au lieu d'être nr comme dans le cas précédent est $\frac{r}{n}$. La résistance totale du circuit est donc $R + \frac{r}{n}$.

Quelle est maintenant la force électromotrice. Si nous plaçons les unes à côté des autres les n petits corps de l'expérience précédente en les disposant comme l'indique la figure 451, c'est-à-dire tous les côtés a étant au contact entre eux et tous les corps b au contact entre eux, on voit que tous les a se mettront en équilibre de température, de même tous les b , mais entre le côté a et le côté b il n'y aura que la différence de température t , la même que pour un élément pris isolément. Il en est de même



Fig. 451.

pour les piles en réunissant tous les pôles positifs entre eux et tous les pôles négatifs entre eux ; entre A et B on aura toujours la différence de potentiel V, quel que soit le nombre des éléments.

Done, en appliquant la formule, on trouve pour l'intensité $I = \frac{V}{R + \frac{r}{n}}$

qui peut s'écrire $I = \frac{nV}{nR + r}$.

Conclusion. — Si l'on a n éléments de pile de force électromotrice V et de résistance r , en les groupant sur une résistance R, on a pour l'intensité du courant, suivant que le groupement se fait en série ou en batterie :

$$(1) \quad I = \frac{nV}{R + nr} \quad \text{ou} \quad (2) \quad I = \frac{nV}{nR + r}$$

Examinons maintenant deux cas extrêmes, celui où la résistance R est extrêmement grande et où par suite, vis-à-vis de cette résistance, on peut négliger r ; et le cas inverse où R est très petit et peut se négliger vis-à-vis de r . Dans le premier cas les formules deviennent :

$$(1') \quad I = \frac{nV}{R} \quad \text{et} \quad (2') \quad I = \frac{nV}{nR} \quad \text{ou} \quad I = \frac{V}{R}$$

Par conséquent, dans ce cas, le courant est d'autant plus intense que le nombre d'éléments est plus grand, avec l'association en série. — Avec l'association en batterie il n'y a aucun intérêt à augmenter ce nombre.

Lorsque nous pouvons négliger R nous avons.

$$(1'') \quad I = \frac{nV}{nr} \quad \text{ou} \quad I = \frac{V}{r} \quad \text{et} \quad (2'') \quad I = \frac{nV}{r}$$

Par conséquent il n'y a alors avec l'association en série aucun intérêt à augmenter le nombre des éléments; au contraire, avec l'association en batterie, l'intensité croît proportionnellement au nombre de ces éléments.

Il en résulte, au point de vue de la conduite à tenir, que, lorsqu'on dispose d'un certain nombre d'éléments de pile, quand on a une résistance extérieure très considérable, il faut les associer en série. Quand la résistance extérieure est négligeable, il faut les associer en batterie. Comme exemple nous citerons le cas du corps

humain, très résistant; lorsque l'on veut le traverser par un courant, les éléments affectés à cet usage doivent être associés en série. Le galvanocautère étant très peu résistant nécessite au contraire l'association en batterie.

Souvent on se trouve dans une situation intermédiaire, la résistance n'est pas immense, elle n'est pas non plus nulle. Il y a alors une association mixte qui conviendra le mieux et qu'il faut chercher. Supposons par exemple que l'on ait six éléments de pile, on

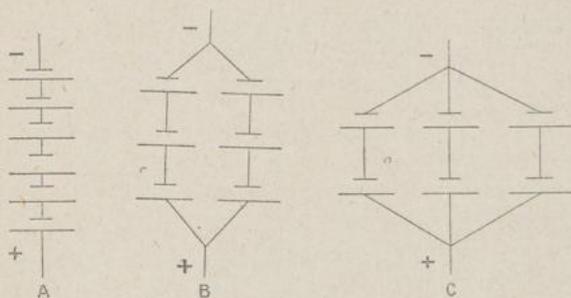


Fig. 452.

pourra les grouper de quatre façons représentées sur les figures 452 et 453.

On peut mettre les six éléments en série (A).

On peut faire deux séries de trois éléments chacune et associer ces deux séries en batterie (B); ou bien faire trois séries de deux

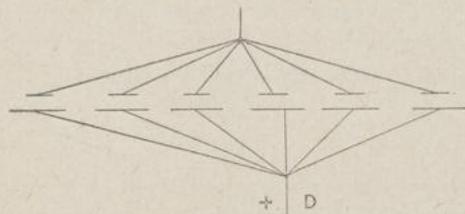


Fig. 453.

éléments chacune associés en batterie (C), ou enfin associer les six éléments en batterie (D).

Suivant la résistance extérieure on aura avantage à employer l'un ou l'autre de ces groupements A correspondant au cas d'une résistance énorme, D au cas d'une résistance presque nulle, et C, B à des cas intermédiaires.

Dans ces quatre cas, l'intensité du courant est donnée par les formules

$$A. \quad I = \frac{6V}{R + 6r}$$

$$B. \quad I = \frac{3V}{R + \frac{3r}{2}} = \frac{6V}{2R + 3r}$$

$$C. \quad I = \frac{2V}{R + \frac{2r}{3}} = \frac{6V}{3R + 2r}$$

$$D. \quad I = \frac{V}{R + \frac{r}{6}} = \frac{6V}{6R + r}$$

Si l'on connaît la valeur de R est de r , il faudra chercher quelle est celle de ces formules donnant la plus petite valeur pour le terme en dénominateur, c'est-à-dire la plus grande intensité. — On déterminera ainsi le mode d'association à adopter.

VIII

EMPLOI DU COURANT CONTINU

Dans l'emploi du courant continu, dont les méthodes de mesure seront indiquées plus loin, il faut pouvoir interrompre ce courant ou le faire passer à volonté dans le circuit où on l'utilise, sans être obligé, à chaque fois, d'attacher et de détacher des fils; il faut aussi pouvoir renverser à volonté le sens de ce courant et en graduer l'intensité. Divers dispositifs sont utilisés dans ce but.

Les interrupteurs de courant sont si nombreux qu'on ne saurait les décrire, et chaque expérimentateur s'inspire des circonstances pour en faire de nouveaux. Un des plus simples (fig. 454) consiste dans l'emploi de deux godets à mercure intercalés dans le circuit, un cavalier en cuivre Cu permet de faire passer le courant quand on l'abaisse et de le rompre quand on le relève. Ce dispositif se recommande par sa simplicité et sa sûreté. La clef de Morse est aussi très répandue. Une pastille métallique

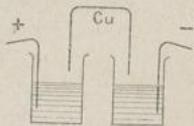


Fig. 454.

P (fig. 455) est en relation avec un des côtés du circuit dont l'autre côté est relié à la clef C. Quand on abaisse la clef on fait le contact entre CP, le courant passe et se rompt quand on retire le doigt, un ressort R relevant la clef. Dans le levier-clef de Du Bois-Reymond (fig. 456 et 457) le fonctionnement est différent. La pile est reliée à deux pièces métalliques A et B, d'où partent aussi

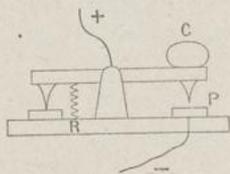


Fig. 455.

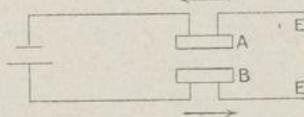


Fig. 456.

deux fils allant vers l'objet E à soumettre au courant. Dans le cas de la figure le courant passe par cet objet, mais si on abaisse la clef entre A et B, tout le courant passe directement de A à B sans aller au corps à électriser.

Ces indications sommaires suffisent. Le nombre des inverseurs de courant est aussi très considérable. Le plus employé en électricité médicale et le plus commode se compose de deux clefs de Morse, comme le représente la figure 458. Les axes O, O' des deux clefs

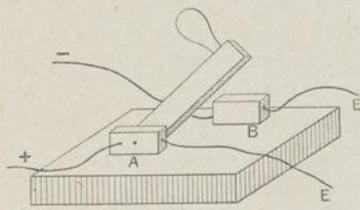


Fig. 457.

sont reliés au circuit dans lequel on veut faire passer le courant. Au repos les deux clefs reposent sur un bloc métallique unique AA' relié au pôle + de la pile, par exemple. Si l'on vient à abaisser l'une d'entre elles, elle prend contact sur un bloc BB' relié au pôle négatif.

Ceci étant, abaissons la clef A'B' en pressant du doigt sur le bouton correspondant, O restera en communication avec le pôle positif de la pile, O' sera mis en communication avec le pôle négatif et le courant passera par le circuit XY dans le sens des flèches. Si, au contraire, on abaisse AB, c'est O' qui reste en communication avec le pôle positif, O qui sera mis en relation avec le pôle négatif, le courant passera par XY en sens inverse des flèches.

Ce dispositif est très commode pour orienter à volonté le sens du courant dans un circuit.

Occupons-nous enfin de la gradation de l'intensité du courant. Plus loin on verra comment se mesure cette intensité; pour le moment nous allons seulement examiner les dispositifs qui nous permettent de la faire varier.

En premier lieu on peut, étant donné un circuit, introduire successivement dans ce circuit un plus ou moins grand nombre d'éléments. Ce procédé est très employé dans les piles portatives ser-

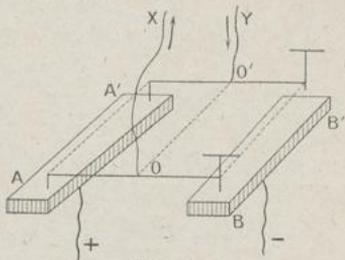


Fig. 458.

vant en électrothérapie. Dans ce cas la résistance du circuit extérieur, corps humain, est très grande, les éléments doivent être groupés en série, il y a lieu de rechercher comment on peut introduire successivement un nombre croissant d'éléments dans le circuit sans le rompre. Il y a en effet nécessité absolue à ne pas interrompre le courant, son intensité doit varier graduellement et ne pas prendre subitement une valeur élevée ou tomber de cette valeur à zéro, ce qui arriverait infailliblement s'il fallait rompre le circuit pour y introduire un nouvel élément.

Le dispositif en usage est représenté schématiquement par la figure 459. Les éléments successifs sont reliés en série et les fils de jonctions de deux éléments sont mis en communications avec des plots métalliques

1, 2, 3, 4, etc. Le premier plot est rattaché au pôle — par exemple, du premier élément; le deuxième plot au fil de jonction du premier élément et du second, etc.

Plaçons un des fils allant au circuit dans lequel il faut faire passer le courant sur le premier plot. L'autre fil sera relié à un frotteur pouvant glisser sur les divers plots; on voit que lorsque ce frotteur sera sur le premier plot il n'y aura aucun courant dans le circuit; quand il sera sur le deuxième plot, le premier élément seul sera dans le circuit et fournira le courant; sur le troisième plot les deux premiers éléments seront dans le circuit, et ainsi

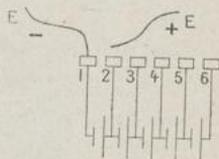


Fig. 459.

de suite, on pourra successivement introduire tous les éléments dans le circuit et faire croître à volonté l'intensité du courant.

Ce dispositif est connu sous le nom de collecteur simple. On

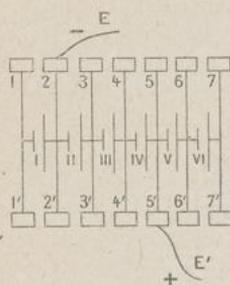


Fig. 460.

peut aussi adopter un collecteur double dans lequel il y a deux rangées de plots, disposés comme l'indique la figure 460 et auxquels sont reliés les éléments. Il est facile de voir à la simple inspection de la figure que l'on peut, en plaçant convenablement les ressorts frotteurs, introduire dans le circuit une série quelconque d'éléments qui se suivent. Ainsi, dans le cas qui est représenté, on emploie II, III et IV, le pôle + est en E', le pôle - en E; l'élément I est hors du circuit d'un côté, les éléments V et VI de l'autre côté. D'une façon générale, quand on place les frotteurs sur deux plots quel-

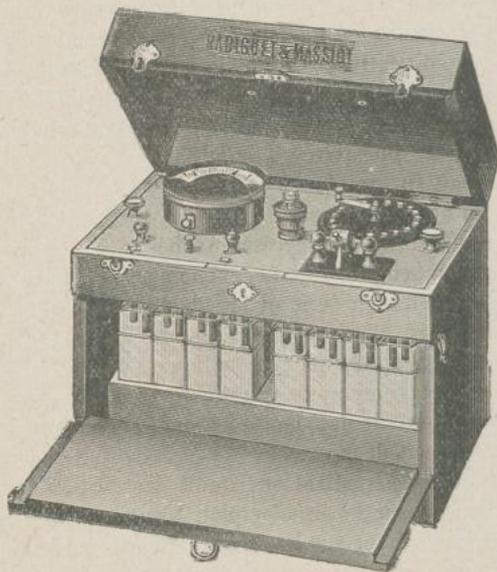


Fig. 461.

conques, on a dans le circuit un nombre d'éléments donné par la différence entre les numéros d'ordre des plots, et le pôle positif

est du côté du ressort le plus avancé. On peut ainsi employer à volonté les éléments du commencement, du milieu, ou de la fin de la série et les user également. Le collecteur simple a au contraire l'inconvénient de mettre toujours en service les premiers éléments et de ne se servir que rarement des derniers. Il en résulte que les premiers sont complètement usés alors que les derniers sont encore satisfaisants, et cependant il faut envoyer la pile en réparation.

En général dans les piles médicales portatives c'est le collecteur double qui est employé. Les éléments sont rangés dans une boîte et reliés à un collecteur disposé sur une planchette couvrant les éléments; un couvercle permet de garantir le tout (fig. 461). Dans ce cas les collecteurs, au lieu d'être rectilignes, comme on l'a supposé sur les figures précédentes, sont circulaires. Les ressorts frotteurs sont placés au bout de manettes tournant autour d'un axe perpendiculaire au tableau et passent ainsi sur les plots rangés en cercle. Cela ne change absolument rien au principe du collecteur.

Remarquons qu'il n'y a pas d'interruption dans le courant à mesure de l'introduction ou de la suppression successive d'éléments dans le circuit, à condition toutefois que les frotteurs ne perdent jamais le contact avec les plots, c'est-à-dire qu'ils ne doivent abandonner un plot qu'au moment où le contact est déjà pris avec le plot suivant; il y a alors une petite variation brusque du courant résultant de l'introduction ou de la suppression d'un seul élément. S'il y avait, à un moment donné, saut du frotteur d'un plot à l'autre, il y aurait, pendant un instant, rupture du circuit et il en résulterait une variation brusque considérable du courant. Ceci se produit parfois dans les appareils mal réglés ou mal entretenus. Il n'y a pas à proprement parler variation continue; dans certains cas la petite augmentation ou diminution brusque d'intensité résultant de l'introduction ou de la suppression d'un élément est gênante. C'est pourquoi dans les installations fixes où l'on n'est pas limité par le volume ou le poids, on préfère régler la variation du courant par une autre méthode.

On peut, au lieu de faire varier le nombre d'éléments, les introduire tous dans le circuit simultanément en ayant dans ce circuit, outre le sujet sur lequel on opère, une résistance considérable accessoire, le courant est alors très faible. Puis on diminue peu à peu la résistance accessoire et l'on fait ainsi varier le courant

à volonté. Nous verrons plus loin quels sont les appareils qui permettent de faire varier à volonté les résistances d'un circuit. Dans ce procédé il faut disposer d'une résistance énorme pour avoir au début un courant très faible; il en résulte une difficulté qui fait souvent préférer un autre procédé dit de la dérivation.

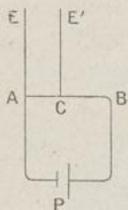


Fig. 462.

La pile P est reliée aux extrémités d'une résistance AB (fig. 462). Les deux fils conduisant au circuit EE' dans lequel on veut faire passer le courant sont reliés l'un à un point fixe A, l'autre à un frotteur C se déplaçant sur le conducteur AB.

Quand le frotteur C est en contact avec A, il est bien certain que tout le courant circule uniquement dans PABP sans aller dans le circuit EE'. A mesure que l'on déplace le frotteur C de A vers B, la résistance AC devient de plus en plus grande, il passe moins de courant par AC et il en passe davantage par le circuit EE'. On peut donc en déplaçant le point C sur AB faire varier graduellement l'intensité du courant.

IX

COURANT ALTERNATIF

Dans les applications de l'électricité à la médecine et à la physiologie le courant alternatif est pour ainsi dire toujours obtenu, jusqu'ici, au moyen de la bobine d'induction.

Les bobines employées dans ce cas ne diffèrent de celles en usage dans les laboratoires de physique et décrites dans les traités généraux d'électricité qu'en ce qu'elles sont réglables.

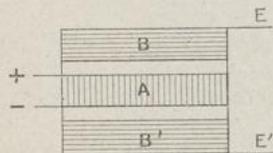


Fig. 463.

On sait que ces bobines se composent d'un inducteur cylindrique A relié à une pile et dans le circuit duquel se trouve un trembleur.

Autour de cet inducteur A et concentriquement à lui se trouve une bobine induite BB' dont le courant alternatif sera utilisé.

La graduation de ce courant se fait de deux façons. Parfois

on introduit entre A et B un cylindre de cuivre conducteur coiffant A et formant écran entre A et B. Plus ce cylindre est enfoncé, et plus il diminue l'action inductrice de A sur B; on peut donc, au moyen de ce cylindre, dit graduateur, régler l'intensité du courant induit passant dans EE'.

Un autre procédé consiste, l'inducteur A étant fixe, à rendre l'induit mobile en le faisant glisser dans une rainure parallèle à l'axe du cylindre A. BB' coiffera ainsi plus ou moins complète-

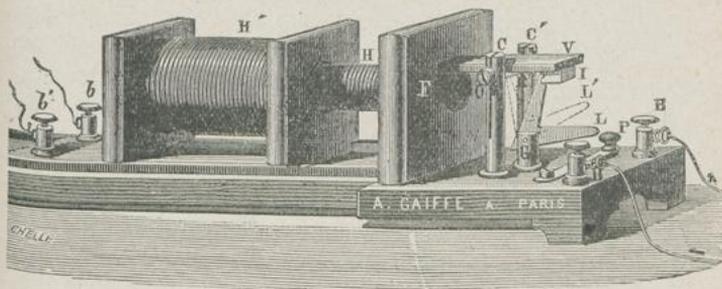


Fig. 464.

ment A, l'action de A sur BB' sera d'autant moindre que l'empiétement sera plus faible, et l'on réglera de la sorte le courant induit. La glissière dans laquelle se déplace BB' est munie d'une graduation qui donne un repère pour les diverses observations, mais il ne faut pas s'illusionner sur sa valeur, cette graduation absolument arbitraire ne donne pas des chiffres proportionnés à l'effet produit par le courant. Nous ne savons pas, à l'heure actuelle, faire une graduation rationnelle du courant alternatif fourni par les bobines.

Les interrupteurs du courant primaire offrent les dispositions les plus variées suivant les constructeurs, mais ils reposent tous sur le même principe que le trembleur ou la sonnerie électrique.

Parfois on a besoin d'appareils très puissants, ils seront examinés de plus près à propos des installations de courants à haute fréquence ou des rayons X.

X

MACHINES DYNAMO-ÉLECTRIQUES

Les machines dynamo-électriques ne sont guère employées en électrobiologie que pour charger les accumulateurs. On se sert alors de la machine Gramme fournissant le courant continu nécessaire à cette charge.

Toutefois certains constructeurs ont établi des machines du type Clark ou Pixii destinées à remplacer les bobines médicales

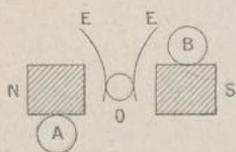


Fig. 465.

pour la production du courant alternatif, il y aurait intérêt à fabriquer des modèles plus pratiques que ceux se trouvant actuellement dans le commerce.

Dans le type Clarke une paire de bobines A, B tournent devant deux pôles d'aimant NS autour d'un axe O qui leur est parallèle (fig. 465). Il s'y produit un courant alternatif recueilli au moyen de ressorts EE' en communication avec le circuit dans lequel on veut lancer le courant, et frottant sur des bagues portées par l'axe O, elles-mêmes reliées au fil des bobines.

Dans le frottement des ressorts EE sur les bagues il y a de petites vibrations et des ressauts impossibles à éviter, il en résulte des perturbations constantes dans le courant. Pour cette raison il y a intérêt à remplacer ce type de machine par le type Pixii, où les bobines sont fixes, les pôles d'aimant tournant devant ces bobines. Comme les bobines sont alors fixes on peut relier directement le fil qu'elles portent au circuit extérieur, sans passer par un ressort frotteur, ni aucun intermédiaire de ce genre.

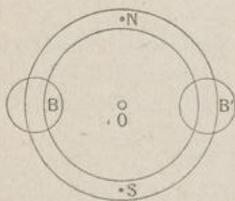


Fig. 466.

Il y a aussi intérêt, comme l'a montré d'Arsonval, à donner à l'aimant une forme particulière. Si l'on prend un anneau d'acier tournant autour d'un axe O et portant des pôles aimantés aux deux extrémités opposées d'un diamètre, NS par exemple, on aura une variation extrêmement régulière du champ magnétique devant les bobines B et B'. Le courant alternatif ainsi obtenu ne présente aucun ressaut

brusque sur ses ondulations, comme cela arrive parfois avec les autres dispositifs. C'est là le modèle, semble-t-il, dont il faudrait partir pour construire un bon appareil médical pratique.

XI

MESURE DES GRANDEURS ÉLECTRIQUES

Intensité. — L'intensité des courants se détermine habituellement au moyen du galvanomètre ou de l'électrodynamomètre.

On sait que si l'on approche un circuit parcouru par un courant d'une aiguille aimantée mobile, orientée sous l'action de la terre, cette aiguille est plus ou moins déviée de sa position, suivant l'intensité du courant et la position du circuit. De même, un circuit parcouru par un courant subit des attractions et des répulsions de la part d'un autre circuit. C'est sur ces phénomènes que sont basés les galvanomètres et les électrodynamomètres. Ces derniers instruments ne sont pas employés en médecine.

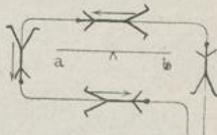


Fig. 467.

Le sens de la déviation d'une aiguille aimantée sous l'influence d'un courant a été donné par Ampère. Il supposait pour cela un bonhomme couché sur le fil parcouru par le courant, ce courant lui entrant par les pieds et lui sortant par la tête. Dans ces conditions, lorsque le bonhomme regarde le pôle nord de l'aiguille aimantée, ce pôle nord tend à se déplacer de sa droite vers sa gauche, le pôle sud va en sens contraire. Par conséquent, si l'aiguille était au début parallèle au fil, elle tend à se mettre en croix avec ce fil. Si l'on dispose ce fil de façon qu'il entoure l'aiguille, passant successivement par-dessus et par-dessous (fig. 467), on constate, en appliquant la règle d'Ampère, que les quatre côtés du cadre ainsi formé ont des actions concordantes sur l'aiguille; ainsi dans le cas de la figure, le pôle nord tend à venir en avant, le pôle sud en arrière du plan du papier. Au lieu de faire faire un seul tour au fil, on peut l'enrouler un grand nombre de fois autour de l'aiguille, on augmente ainsi l'effet d'autant plus que le nombre de tours est plus grand.

C'est là le plus simple des galvanomètres, les premiers appa-

reils employés en médecine étaient construits de la sorte. Ils consistaient essentiellement (fig. 468 et 469) en une aiguille aimantée mobile sur un pivot et entourée par un cadre ABCD portant le fil. L'aiguille *ab* était munie, à l'aide d'une petite tige

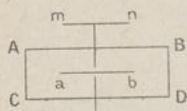


Fig. 468.

rigide traversant la partie supérieure du cadre, d'un index *mn* mobile sur un cadran divisé. L'aiguille avait toujours une tendance à s'orienter suivant le méridien magnétique; quand on voulait faire usage de l'instrument, on faisait tourner sur son support la boîte dans laquelle il était enfermé, de façon que l'aiguille fût au zéro de la graduation; on faisait ensuite passer le courant pour voir quelle était la déviation produite.

Si l'on se contente de diviser en degrés le cadre sur lequel se déplace l'aiguille, on lit la déviation en degrés; mais cela ne donne aucune idée de la valeur réelle du courant, d'autant plus que les déviations ne sont pas proportionnelles aux intensités: un courant donnant une déviation de vingt degrés n'a pas une intensité double de celui qui donne une déviation de dix degrés.

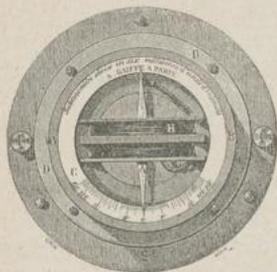


Fig. 469.

On fait alors une graduation en ampères, ou, pour les usages médicaux, en milliampères. Cette graduation se fait par comparaison, c'est-à-dire que l'on place dans le même circuit le galvanomètre que l'on veut graduer et un instrument déjà gradué lui-même, on fait passer le courant et l'on marque sur le galvanomètre à graduer l'intensité lue sur le deuxième instrument. On répète la même opération pour les diverses intensités.

Un galvanomètre ainsi gradué en ampères ou milliampères est dit étalonné. Il prend le nom d'ampèremètre ou de milliampèremètre. Tous les instruments servant dans la pratique médicale doivent être gradués de la sorte.

L'ampèremètre médical que nous venons de décrire a de grands inconvénients. En premier lieu il ne fonctionne pas dans une position quelconque, nous avons dit qu'il faut l'orienter pour que

l'aiguille soit au zéro quand aucun courant n'y passe. Si pendant qu'on en fait usage on le déplace par accident, il faut arrêter les opérations pour le remettre au zéro. De plus, pour que ses indications soient exactes, il doit n'être soumis qu'au champ magnétique terrestre qui oriente l'aiguille. Si, ce qui est fréquent, il se trouve dans ses environs un aimant, ou même du fer, les indications sont faussées. Ainsi dans une salle d'hôpital, au voisinage d'un lit de fer, on a toujours des renseignements erronés.

Pour remédier à cet inconvénient, on emploie aujourd'hui, de préférence, des galvanomètres à aimant fixe.

Si, en effet, l'aimant mobile se déplace sous l'influence du courant fixe, on conçoit qu'inversement en rendant l'aimant fixe et la bobine mobile, cette dernière pourra tourner sur un axe quand elle sera parcourue par un courant.

Considérons un cadre ABCD suspendu au moyen de deux fils métalliques verticaux MN, OP qui serviront à amener les courants dans ce cadre, où il circulera dans le sens des flèches (fig. 470). Plaçons maintenant au milieu du cadre un fort aimant AB.

Nous savons que si l'aimant était mobile il tournerait, A venant en avant du papier et B en arrière. S'il est fixe, c'est le cadre qui va tourner, AC ira en arrière du papier et BD viendra en avant. Il suffira de munir le cadre d'une aiguille

se déplaçant sur un limbe gradué pour lire la valeur de la déviation.

Les fils MN, OP sont métalliques, avons-nous dit; ils servent, en dehors de leur rôle de conducteur, à orienter le cadre par leur élasticité, de façon qu'il soit au zéro quand il n'est parcouru par aucun courant. Quand ce cadre est dévié de sa position, les fils MN, OP se tordent et opposent au mouvement une force d'autant plus grande que la déviation est plus prononcée.

En général, au lieu de placer au milieu du cadre un aimant AB, on y met un fer doux, l'aimant étant extérieur au cadre comme le représente la figure 471.

Dans ces conditions on sait que le fer doux se transforme en aimant temporaire pendant tout le temps de la présence de l'ai-

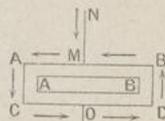


Fig. 470.

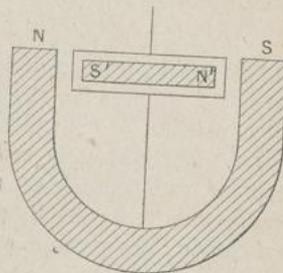


Fig. 471.

mant extérieur, on a ainsi une action plus énergique par suite de la concentration du champ dans les régions NS' et N'S.

Un pareil galvanomètre n'est pas sensible aux variations magnétiques extérieures, car le champ créé par l'aimant NS est tellement puissant que toutes les variations extérieures sont insensibles.

Les galvanomètres médicaux en usage aujourd'hui sont tous basés sur ce principe, ils ne diffèrent les uns des autres que par

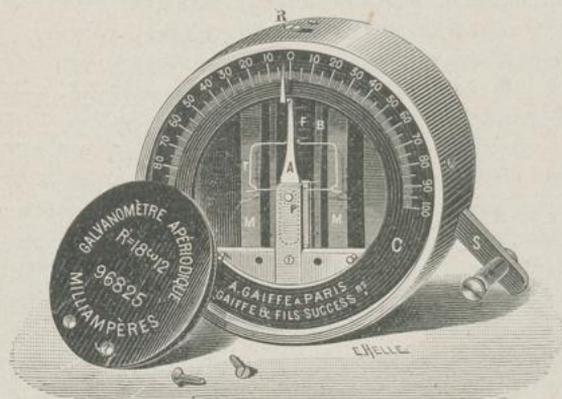


Fig. 472.

des détails de forme, suivant qu'ils sont destinés à rester en place ou à être transportés et suivant les maisons qui les fabriquent. Bien entendu ils doivent toujours être gradués en milliampères.

Le galvanomètre ne doit pas seulement donner l'intensité du courant, mais aussi le sens dans lequel ce courant circule. L'aiguille ou le cadre mobile peuvent dévier vers la droite ou vers la gauche de l'observateur, et dans chacun de ces cas il y a lieu de se demander quelle est la borne positive ou négative de l'instrument. Pour résoudre ce petit problème, très important dans la pratique, il faut faire une expérience préalable. On rattache au galvanomètre une pile, on sait dans ces conditions où est le pôle positif, on le marque d'un signe + sur la tête de la borne, on observe le sens de la déviation et on le note par une flèche ou une indication quelconque. Dès lors, chaque fois qu'on se servira du galvanomètre le sens de la déviation dira si le pôle positif est à la borne marquée du signe + ou à l'autre borne —.

Quand il s'agit de déceler des courants extrêmement faibles, les galvanomètres précédents ne suffisent plus, il faut donc s'adresser à des modèles spéciaux dont le plus répandu est le type Thomson. Voici en quoi il consiste.

Lorsqu'on construit un galvanomètre à aimant mobile suivant les principes exposés plus haut, l'aiguille aimantée est orientée dans le méridien magnétique par le magnétisme terrestre, quand un courant traverse l'instrument cette action terrestre offre une résistance au mouvement de l'aiguille. Il y a intérêt à diminuer autant que possible l'effet de cette orientation terrestre pour que l'action du courant sur l'aiguille soit plus efficace. On obtient ce résultat par deux procédés appliqués tous deux simultanément dans les galvanomètres Thomson. L'équipage mobile se compose d'une première aiguille aimantée ab reliée par un fil vertical rigide à une autre aiguille aimantée $a'b'$ parallèle à la première, mais dont les pôles sont orientés en sens inverse (fig. 473).

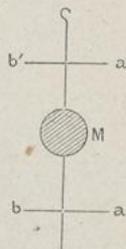


Fig. 473.

Il en résulte que l'action de la terre sur $a'b'$ est inverse de celle sur ab ; si ces deux aiguilles étaient rigoureusement parallèles et égales, cette action serait nulle, l'équipage ne s'orienterait pas. En réalité une pareille égalité est impossible à obtenir, il y a toujours une légère prédominance de l'une ou l'autre aiguille et par suite une orientation sous l'influence des actions terrestres, mais les forces en jeu sont très réduites sur l'équipage. Un pareil équipage est dit *astatique*. De plus, on place au-dessus du galvanomètre, ou au-dessous, un barreau aimanté disposé de façon à agir sur l'équipage en sens inverse du magnétisme terrestre. Avec quelques précautions on arrive à réduire considérablement l'action de ce champ magnétique terrestre. Dans ces conditions l'équipage est presque complètement libre, la plus faible force le fera dévier de sa position.



Fig. 474.

Au lieu de munir cet équipage d'une aiguille mobile sur un cadran, on fixe sur lui un petit miroir convergent M , lequel reçoit un faisceau lumineux parti d'un point P et forme une image P' sur une règle graduée, comme le représente la figure 474, supposée vue de haut en bas. Si le petit miroir tourne d'un angle très faible autour de la verticale, l'image

P' se déplace en P'' sur la règle graduée, d'une longueur d'autant plus grande que l'image P' est plus éloignée du miroir, c'est-à-dire que le miroir a une plus grande distance focale. Les

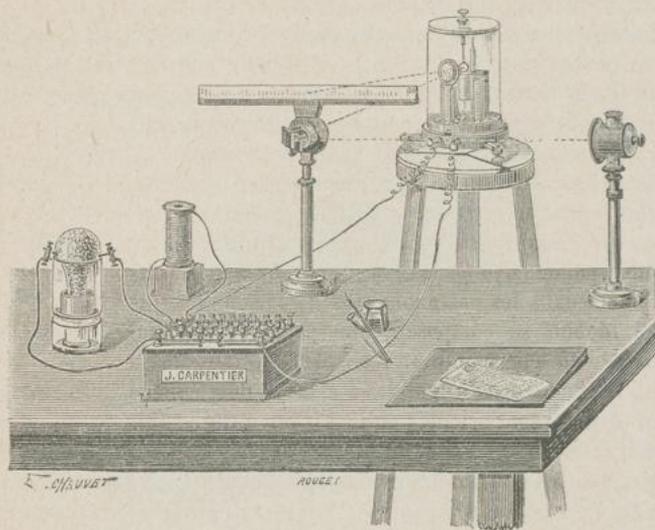


Fig. 475.

moindres rotations du miroir sont ainsi lues avec une grande précision. L'image

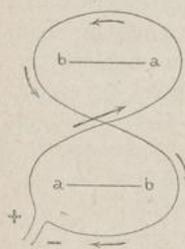


Fig. 476.

peut être reçue sur un écran pour être montrée à un grand nombre de personnes dans un amphithéâtre, ou sur une règle graduée de dimensions plus réduites, sur laquelle les divisions seront plus fines. La figure 475 représente un galvanomètre à équipage mobile muni d'un miroir, devant lequel se trouve une échelle. Le faisceau lumineux partant d'une lumière placée à côté de l'échelle est envoyé sur l'équipage au moyen d'un miroir incliné.

Enfin dans le Thomson, le fil est enroulé, de façon à avoir son maximum d'effet, sur deux bobines placées vis-à-vis des deux aiguilles. L'enroulement est inverse sur ces deux bobines (fig. 476). Il est aisé de voir au moyen de la règle d'Ampère que dans ces conditions les actions du courant sur les

deux aimants ajoutent leurs effets, c'est-à-dire tendent à donner à l'équipage une déviation de même sens.

Au sujet de ce fil, il y a une remarque importante à faire. Comment doit-il être, fin et long, ou bien gros et par suite forcément plus court? Il semble au premier abord que l'on ait toujours intérêt à prendre un fil fin et long de façon à faire un grand nombre de tours de spire. Chaque tour ajoutant son effet à celui des autres. Cela est vrai, mais en augmentant la longueur et la finesse du fil, on augmente aussi la résistance du galvanomètre, par conséquent on diminue l'intensité du courant. Il y a donc deux actions qui se contre-balancent : diminution de l'intensité du courant, augmentation du nombre des tours de spire. La théorie et l'expérience nous montrent que, suivant les cas, il y a intérêt à augmenter plus ou moins la longueur du fil. A chaque cas correspond un fil meilleur que tous les autres. Dans la pratique on ne peut avoir toute une série de bobines, on se limite généralement à deux cas : une paire de bobines, à fil très long et très fin et une autre paire à fil plus gros. La première paire sert quand on doit intercaler le galvanomètre dans un circuit déjà très résistant par lui-même, où, par suite, une augmentation de résistance provenant du galvanomètre ne diminuera pas sensiblement l'intensité du courant. C'est le cas des recherches d'électro-physiologie proprement dite, quand on veut déceler les courants produits par les tissus animaux, corps très résistants, par exemple par un nerf placé dans le circuit du galvanomètre. La deuxième paire de bobines sert quand le circuit à explorer a par lui-même une très faible résistance, quand c'est, par exemple, un couple thermo-électrique destiné à mesurer les variations de température d'un milieu, comme on le verra plus loin.

Les galvanomètres médicaux destinés à mesurer les courants employés en thérapeutique sont généralement peu résistants. Ils ont en effet une sensibilité suffisante avec un petit nombre de tours de fil, et cette faible résistance a l'avantage de ne pas changer les conditions de résistance du circuit sur lequel on opère.

Il arrive souvent que le galvanomètre dont on dispose soit trop sensible pour les opérations que l'on veut exécuter. Par exemple, on n'a à sa disposition qu'un galvanomètre allant jusqu'à 10 milliampères, au delà l'aiguille sort de la graduation, et l'on veut mesurer jusqu'à 400 milliampères. On établit alors un shunt, c'est-à-dire qu'entre les bornes du galvanomètre on met un fil S

de résistance convenable (fig. 477). Le courant, au lieu de passer tout entier dans le galvanomètre se divise, une partie passe par le galvanomètre et une partie par le shunt, comme l'indique la figure. Si le shunt laisse passer les $\frac{9}{10}$ du courant, quand on lira 5 milliampères au galvanomètre, il en passera en réalité 50 par le circuit principal AB. Souvent les constructeurs livrent avec les galvanomètres une série de shunts réduisant les courants à $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{1\ 000}$, sinon il faut les faire soi-même.

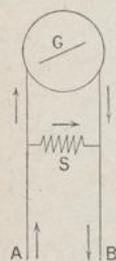


Fig. 477.

Les galvanomètres très sensibles ne sont généralement pas étalonnés. Cela se conçoit, les lectures que l'on fait dépendent de la distance focale du miroir porté par l'équipage et plus encore du degré de sensibilité donné à l'instrument par la position de l'aimant directeur. Dans chaque cas il faut donc étalonner son galvanomètre. L'expérience montre que l'équipage ne dévient généralement que très peu du zéro, les intensités sont proportionnelles aux déviations, c'est-à-dire qu'en lisant sur l'échelle 20 divisions on a un courant double de celui qui donne une déviation de 10 divisions, et ainsi de suite. Il suffit donc de connaître l'intensité, en unités adoptées, correspondant à une déviation quelconque. Voici comment on opère pour obtenir ce résultat. On met dans le circuit du galvanomètre une pile dont on connaît la force électromotrice, un Daniell par exemple ayant 1 v. 08. On intercale aussi dans le circuit une résistance qui sera toujours très grande étant donnée la grande sensibilité de l'instrument, 1 080 000 ohms par exemple, et on lit la déviation. Cette déviation correspondra à $\frac{1,08}{1\ 080\ 000} =$ un millionième d'ampère. On verra plus loin comment on se procure la résistance convenable pour cette opération. Il est bien évident qu'en présence d'une résistance aussi énorme il n'est généralement pas nécessaire de tenir compte, lors du calcul de l'intensité, de la résistance du galvanomètre, et jamais de celle de la pile qui ne dépasse pas quelques unités.

Depuis quelques années, un nouveau galvanomètre, dit galvanomètre à corde, dû à Einthoven de Leyde, a été très employé pour diverses expériences d'électro-physiologie, et a même passé dans la clinique.

Cet instrument se compose essentiellement d'un fil conducteur

très léger AA (fig. 478), tendu entre les deux pôles PP, d'un électro-aimant très puissant. Quand ce fil est parcouru par un courant

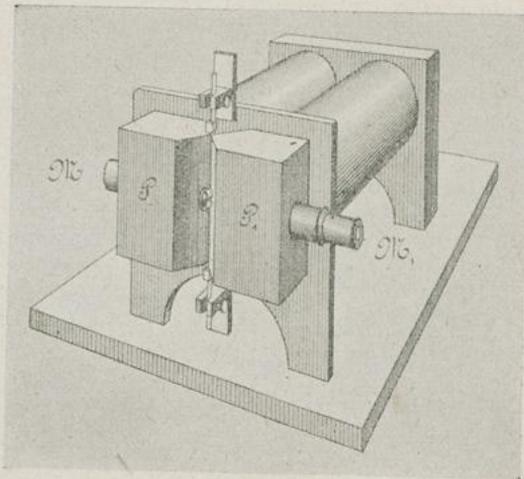
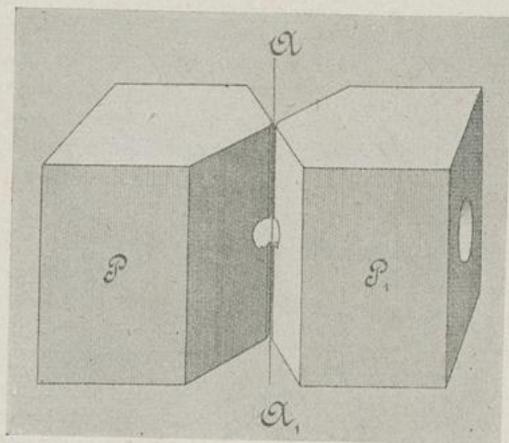


Fig. 478.

il est dévié de sa position d'équilibre, ce que l'on constate à l'aide d'un microscope M. Ce galvanomètre a une sensibilité extrême qui dépasse celle des meilleurs Thomson. De plus il est très

apériodique, c'est-à-dire qu'il n'a aucun retard dans ses indications. En projetant au moyen de M, l'image du fil sur un papier photographique sensible se déroulant derrière une fente, on peut obtenir des tracés représentant les fluctuations les plus variées d'un courant passant par le fil. Dans ce cas il faut un éclairage très puissant obtenu par l'arc électrique et un condensateur approprié M.

Nous verrons plus loin comment on a utilisé cet appareil pour l'étude des altérations dans le fonctionnement du cœur.

Différences de potentiel. — On a souvent à mesurer la force électromotrice d'une pile ou d'une batterie d'accumulateurs, on se sert alors d'un voltmètre. Supposons que nous fassions passer le courant d'une pile dans un galvanomètre, nous lirons une certaine déviation qui dépendra uniquement de l'intensité du courant. Or ce courant varie avec la force électromotrice et la résistance du circuit suivant la formule $I = \frac{E}{R}$. Il suffit de regarder cette formule pour comprendre que si la résistance du circuit était toujours la même, l'intensité du courant ne dépendrait plus que de la force électromotrice. Pour une même force électromotrice, le galvanomètre donnerait toujours la même indication, et l'on pourrait graduer en volts le limbe sur lequel se déplace l'aiguille. On obtient ce résultat en donnant au galvanomètre une résistance très grande; dans ces conditions les résistances des diverses piles que l'on voudra étudier n'ont plus qu'un effet négligeable. Ainsi donnons au galvanomètre une résistance de 10 000 ohms, quand nous attacherons à ses bornes des piles dont la résistance sera inférieure à 10 ohms, ce qui est le cas de la pratique, la résistance totale du circuit variera dans les limites de 10 000 ohms au moins à 10 010 ohms au plus, on n'aura jamais d'erreur supérieure à $1/1\ 000$, c'est-à-dire des erreurs insignifiantes pour ce genre de mesures. Le voltmètre est donc tout simplement un galvanomètre très résistant gradué en volts; tout galvanomètre très résistant peut se graduer en volts et devenir un voltmètre.

Parfois on désire mesurer une différence de potentiel sans débiter de courant à travers l'appareil de mesure, cela pour des raisons très variées, par exemple pour ne pas déranger les conditions d'un circuit, ou parce que la source à étudier ne peut fournir de courant sans se décharger; on se sert alors d'un électromètre.

Voici le principe sur lequel sont basés les électromètres. Prenons deux corps, l'un mobile A, l'autre fixe B (fig. 479). Relions le corps B à une source électrique connue, il prendra une certaine charge M. Relions ensuite A à la source que nous voulons étudier, il prendra ainsi une certaine charge m et subira de la part de B une répulsion ou une attraction que nous pouvons lire sur un cadran ou au moyen d'un miroir fixé sur A. Or nous savons que la charge que prend A est proportionnelle à un accroissement de potentiel, c'est une des lois fondamentales de l'électricité. Par conséquent les attractions que subira A de la part de B seront en réalité proportionnelles au potentiel des corps mis en relation avec A. C'est là le principe des électromètres. Au lieu de charger B d'une façon constante, on peut charger A avec une source toujours la même et mettre B en relation avec le corps à étudier; c'est alors B qui prend une charge proportionnelle au potentiel de corps, le résultat est le même. Si maintenant nous prenons deux corps fixes, B et C, de part et d'autre de A, A subira la résultante des attractions ou répulsions de C et de B sur A et la déviation de A dépendra de la différence de ces actions, c'est-à-dire de la différence du potentiel entre C et B, si C et B ont la même capacité électrique.

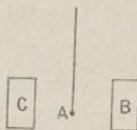


Fig. 479.

Si donc on veut connaître la différence de potentiel entre deux corps ou deux points d'un corps, on relie ces deux points à B et C, on charge A toujours de la même façon, et on lit la déviation de A : cette déviation sera proportionnelle à la différence de potentiel entre B et C.

C'est là le dispositif fondamental d'où dérivent les électromètres, ils ne diffèrent les uns des autres que par des détails de construction sur lesquels nous n'insistons pas, ces appareils étant d'un usage très spécial dans les laboratoires médicaux.

Il y a toutefois un instrument basé sur un principe complètement différent et dont l'emploi s'est beaucoup répandu dans les laboratoires de physiologie depuis quelques années, c'est l'électromètre de Lippmann.

Lorsque dans un tube effilé à la partie inférieure, on verse d'abord de l'eau acidulée, puis du mercure, si l'étiement est assez capillaire, le mercure ne s'écoule pas, même sous une pression assez considérable. Il se forme un ménisque dans la pointe que l'on fait plonger, comme l'indique la figure, dans un

vase contenant de l'eau acidulée sur un fond de mercure. Un microscope permet d'observer le ménisque dans la partie capillaire. Mettons le mercure du tube en relation avec le pôle négatif

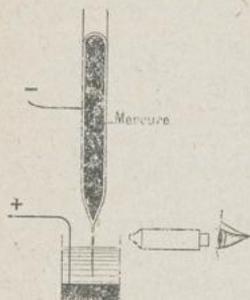


Fig. 480.

d'une pile et le mercure du vase en relation avec le pôle positif, aussitôt nous constatons que le mercure s'élève dans le tube, à une hauteur variable suivant la différence de potentiel entre les deux masses de mercure. On peut ramener le ménisque au point primitif en exerçant une pression sur le mercure du tube, et la pression nécessaire à cet effet est proportionnelle à la différence de potentiel étudiée; ou bien on peut lire le déplacement du ménisque.

Ce dispositif est d'une très grande sensibilité, il permet, entre autres, d'étudier les différences de potentiel qui se produisent aux divers points des tissus vivants et a reçu de nombreuses applications dans ce but depuis quelques années. On peut d'ailleurs enregistrer par la photographie les mouvements de la colonne de mercure. L'un des grands avantages de cet instrument consiste dans la rapidité avec laquelle il se met en équilibre, ce qui le rend particulièrement propre, grâce à l'enregistrement photographique, à l'étude des variations de potentiel très rapides, accompagnant certains phénomènes physiologiques qui seront exposés plus loin.

Souvent, dans les laboratoires, on a besoin d'un étalon de force électromotrice pour graduer un appareil de mesure. Le mieux est de monter avec soin un élément Daniell et de lui attribuer une force électromotrice de 1 v. 08. L'erreur que l'on peut commettre ainsi est trop faible pour avoir quelque importance dans les recherches de physiologie.

Quand on a à mesurer des potentiels extrêmement élevés, comme ceux produits par les machines statiques, le problème devient assez

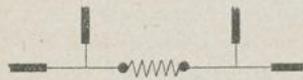


Fig. 481.

délié. Dans la pratique d'électrothérapie on se contente alors généralement d'une évaluation approximative. On fait jaillir des étincelles entre les boules de l'excitateur relié à la machine, et on écarte peu à peu ces boules jusqu'à la limite à laquelle l'étincelle cesse de se produire. Plus cette dis-

tane
boul
corre
ne c
autre

R
appr

I =

la ré
d'un
mètr
élect
qu'av
d'un
dans
pères
sera

au c
mesu

Il
lance
les p
déter
pour
dispo
qui c
vent
entre
exem
suiva

comp
la cor
Voici
pouvo
d'ébo
les un
les bo

tance est grande, plus la différence de potentiel entre les deux boules est élevée. Une table donne les valeurs des potentiels correspondant aux différentes longueurs d'étincelle. Cette table ne convient pas à une machine quelconque, car elle dépend entre autres des diamètres des boules de l'excitateur.

Résistances. — Souvent, quand on a besoin de connaître approximativement une résistance, on peut la déduire de la formule $I = \frac{V}{R}$ que l'on écrit $R = \frac{V}{I}$. On fait alors passer un courant dans

la résistance à mesurer, on évalue l'intensité du courant au moyen d'un ampèremètre. D'un autre côté on mesure à l'aide d'un voltmètre la force électromotrice employée. En divisant cette force électromotrice par l'intensité, on a la résistance. Ainsi, supposons qu'avec un voltmètre nous ayons mesuré la force électromotrice d'une pile et trouvé 45 volts, en reliant cette pile à un circuit dans lequel se trouve un milliampèremètre on trouve 3 milliampères, ce qui, en ampères, s'écrit 0,003. La résistance du circuit sera $\frac{45}{0,003} = 5,000$ ohms. Cette méthode est souvent employée, au cours d'une application du courant sur le corps humain, pour mesurer la résistance des tissus traversés par le courant.

Il est beaucoup plus précis de comparer directement les résistances à étudier à des résistances de valeur connue, comme dans les pesées on compare le poids des corps aux poids d'autres corps déterminés. A cet effet, on se sert de boîtes de résistance, comme pour les pesées on a des boîtes à poids. Dans ces boîtes se trouve disposée une série de résistances, qui convenablement associées, peuvent donner tous les intermédiaires entre un minimum de 1 ohm par exemple et un maximum variable suivant les boîtes; il suffit pour comprendre cela de se reporter à la composition des boîtes de poids.

Voici comment les diverses résistances sont disposées de façon à pouvoir se combiner les unes avec les autres. Sur une planche d'ébonite (fig. 482) se trouve une série de plots métalliques isolés les uns des autres. Au-dessous de la planche, dans la boîte, sont les bobines A, B, C, D, etc., reliées les unes aux autres en série.

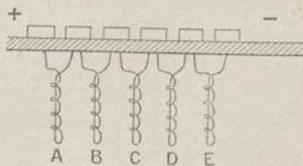


Fig. 482.

Le point de jonction de deux bobines est aussi en communication avec un plot. Dans le cas de la figure 482 si l'on met les plots extrêmes en relation avec une pile, le courant est obligé de traverser toutes les bobines, il passe donc par toutes les résistances. Si l'on vient à intercaler une cheville métallique entre deux plots le courant passe par la cheville, la bobine reliée à ces deux plots, est hors service, sa résistance ne compte plus. On peut donc, en retirant un nombre convenable de chevilles, mettre

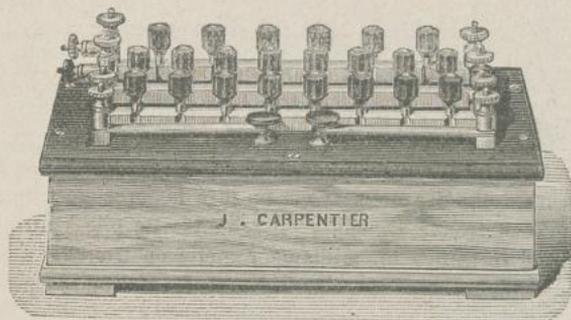


Fig. 483.

dans le circuit les bobines que l'on désire. En plaçant toutes les chevilles entre les plots on n'a plus que la résistance de ces plots et des chevilles, c'est-à-dire une résistance négligeable.

Voici dès lors comment on peut employer une pareille boîte pour mesurer une résistance. On place dans un même circuit une pile, un galvanomètre et la résistance à mesurer. On lit la déviation du galvanomètre qui n'a pas besoin d'être étalonné. On retire du circuit la résistance à étudier et on la remplace par une boîte dont on tirera des chevilles jusqu'à ramener la même déviation du galvanomètre. À ce moment comme le courant est ramené à son intensité primitive, il est évident que la résistance du circuit n'a pas changé. La valeur de la boîte à ce moment représente la résistance étudiée, il n'y a donc qu'à lire la résistance de la boîte, c'est-à-dire à faire la somme des résistances correspondant aux chevilles retirées.

Cette méthode a un inconvénient: si pendant la substitution de la boîte à la résistance à étudier, la force électromotrice de la pile a changé, les résultats sont erronés. C'est pourquoi on emploie en général de préférence la méthode dite du pont de Wheatstone. Voici en quoi elle consiste. Plaçons dans les quatre branches d'un

quadrilatère, la résistance x à déterminer et trois résistances que l'on peut connaître : par exemple des boîtes étalonnées, R, R_1, R_2 . Relions les extrémités d'une des deux diagonales à une pile P , et les extrémités de l'autre diagonale à un galvanomètre G .

Retirons maintenant les clefs des boîtes jusqu'à ce que le galvanomètre G reste au zéro. On démontre à ce moment les quatre résistances x, R, R_1, R_2 satisfont à la relation $\frac{x}{R_2} = \frac{R_1}{R}$. Comme

on connaît R, R_1, R_2 , on peut calculer x .

Quand on veut appliquer les méthodes habituelles de mesure à la détermination de la résistance du corps humain ou des tissus vivants on se heurte à de grosses difficultés résultant d'une série de modifications qui se passent dans ces tissus sous l'influence du courant. Une des principales de ces difficultés réside dans l'existence de la polarisation dont il sera question plus loin et qui introduit des résistances fictives.

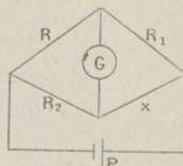


Fig. 484.

Pour écarter cette polarisation on a cherché à faire des mesures en se servant, au lieu de courants continus, de courants alternatifs qui ne donnent pas lieu à la polarisation. Dans la méthode du pont de Wheatstone, en employant le courant alternatif, c'est-à-dire en remplaçant la pile par une bobine d'induction, on ne peut plus employer le galvanomètre pour rechercher si la diagonale G n'est le siège d'aucun courant. On remplace alors le galvanomètre par un appareil sensible aux courants alternatifs, le téléphone. Quand ce téléphone est au silence, l'équilibre du pont est établi comme précédemment et la relation $\frac{x}{R_2} = \frac{R}{R_1}$ est satisfaite. Cette méthode est très précieuse pour faire des mesures de résistance dans tous les cas où l'on veut écarter la polarisation.

Dans les applications de l'électrothérapie, on a souvent à faire usage de résistances variables à volonté, soit pour faire des mesures, soit pour graduer l'intensité des courants.

Le maniement des boîtes étant un peu compliqué, l'on préfère renoncer à leur haute précision pour gagner en commodité; on fait alors usage de rhéostats.

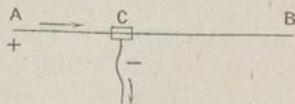


Fig. 485.

Le type du rhéostat est un fil conducteur AB, dont une extrémité A est en relation avec un côté du circuit où doit passer le courant, ce courant retournant au même circuit par un curseur C, dans le sens indiqué sur la figure par des flèches. Il est évident que l'on fera varier la résistance en déplaçant le curseur, elle augmentera quand on ira de A vers B, diminuera dans les déplacements de sens inverse.

Quand on veut constituer un pareil rhéostat par un fil métallique rectiligne, on constate rapidement que l'on est très limité dans les variations de résistance que l'on peut obtenir, sous peine d'avoir des fils de longueur démesurée. On tourne la difficulté par divers procédés mis en œuvre dans les différents modèles de

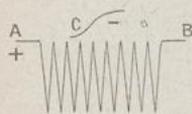


Fig. 486.

rhéostats. On peut, comme l'indique la figure 486, disposer le fil en spirale ou en ligne brisée pour en avoir une grande longueur, le curseur C viendra alors frotter sur une partie mise à nu. On n'a plus dans ce cas une variation de résistance bien continue, car on introduit tout à coup une spire entière de fil dans le circuit, mais dans bien des cas cela n'a pas grande importance.

On peut aussi disposer le rhéostat en conducteur rectiligne en choisissant une matière relativement peu conductrice, comme le graphite; ces appareils sont de qualité médiocre et sujets à variation.

Enfin on peut se servir de liquides. Par exemple, dans un tube vertical on met une solution de sulfate de cuivre, la partie inférieure du tube contient une plaque de cuivre conduisant au circuit. A la partie supérieure se trouve un plongeur également en cuivre venant de l'autre extrémité du circuit (fig. 487). En enfonçant plus ou moins ce plongeur, on fait varier la longueur de la colonne liquide interposée et par suite la résistance du circuit. Grâce à la grande résistance des liquides cette variation peut être très considérable.

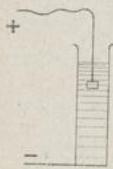


Fig. 487.

On sait que, pour un conducteur métallique ou liquide, la résistance électrique est une grandeur bien déterminée, comme le poids ou le volume. Toutefois cette résistance varie avec la température, elle devient plus grande pour les conducteurs métalliques quand la température s'élève et devient au contraire plus faible pour les liquides.

Quand on fait des mesures de résistance des tissus organisés et en particulier du corps humain, il n'en est plus de même; on constate des variations, parfois considérables, sans causes apparentes. Ainsi, en mesurant la résistance qu'éprouve un courant en passant d'une main à l'autre, on trouve sur une même personne, dans les mêmes conditions expérimentales, des chiffres qui varient d'un jour à l'autre. A titre d'exemple, et pour permettre d'apprécier l'étendue de ces variations, voici un petit tableau se rapportant à quatre personnes avec les résistances les plus grandes et les plus petites trouvées sur elles, les mesures étant faites, d'une main à l'autre dans les mêmes conditions, à divers jours :

S.	1 080 à 1 460 ohms.
M.	1 050 à 1 580 —
H.	1 060 à 1 580 —
L.	1 100 à 1 760 —

La résistance électrique est généralement un peu plus élevée chez les femmes que chez les hommes, la moyenne chez les premières est en effet d'environ 1 400 à 1 500 ohms d'une main à l'autre, tandis qu'elle tombe à 1 200-1 300 ohms chez les seconds. Cela semble assez paradoxal, car de nombreuses expériences ont montré que la résistance du corps humain réside en grande partie dans la peau, qui ne passe pas pour plus fine chez l'homme que chez la femme. Quoi qu'il en soit, le fait n'est pas douteux.

La température joue un rôle très net : plus elle s'élève, plus la résistance baisse. Dans toutes ces mesures il faut avoir soin de prendre le contact avec le corps par l'intermédiaire d'un liquide; c'est-à-dire que l'on fait plonger les mains dans des cristallisoirs contenant de l'eau à une température voisine de celle du corps humain. De plus, les mains doivent avoir été au préalable lavées au savon et brossées. Faute de prendre ces précautions, on arrive aux chiffres les plus fantaisistes. Ainsi, en faisant le contact au moyen de morceaux de métal, de laiton par exemple, saisis à pleine main, on peut voir la résistance monter à 100 000 ohms et plus, par suite de la sécheresse plus ou moins grande de la peau ou des matières grasses dont elle est toujours un peu imprégnée.

Cette résistance varie du reste à volonté en serrant plus ou moins les électrodes.

Quand le courant traverse les tissus pendant un certain temps, la résistance baisse peu à peu, sans doute par suite d'actions élec-

trolytiques se passant dans les tissus et en particulier dans la peau au contact des électrodes.

Enfin il y a un fait spécial aux tissus organisés, c'est que la résistance varie dans de grandes proportions avec l'intensité du courant. Le petit tableau suivant pourra donner une idée de ces variations avec l'intensité.

Intensité.	Résistance.
5	1 370 ohms.
10	1 350 —
23	1 160 —
10	1 260 —
6	1 340 —

On voit dans cet exemple l'effet de la durée du passage du courant superposer son action à celle de l'intensité, car en revenant aux mêmes intensités à la fin de l'expérience on trouve des résistances plus faibles qu'au début.

Quantités. — Il peut se présenter deux cas nettement distincts quand on veut évaluer des quantités d'électricité; ou bien il s'agit de déterminer la quantité d'électricité qui s'écoule à travers un circuit pendant un temps donné; ou bien il faut déterminer la quantité d'électricité statique se trouvant sur un corps conducteur isolé.

Dans le premier cas on intercale un galvanomètre dans le circuit, on lit l'intensité et on la multiplie par le nombre de secondes pendant lequel le courant a passé, cela résulte de la formule générale donnée précédemment $Q = It$.

Ainsi si un courant de 0,5 ampère a passé pendant 30 secondes; il a passé dans le circuit 15 coulombs. Il peut arriver que le courant ne reste pas constant pendant toute la durée du passage, il faut alors diviser cette durée en périodes plus petites pendant lesquelles le courant peut être considéré comme constant, et calculer la quantité d'électricité qui passe pendant chacune de ces périodes.

Le procédé qui précède est un des plus commodes pour la pratique médicale, d'autant plus que dans ce cas il suffit en général d'une approximation assez faible. On peut, cependant, par une seule lecture, être renseigné sur la quantité d'électricité qui a passé dans un circuit: pour cela on intercale dans ce circuit

un voltamètre, c'est-à-dire un appareil à décomposition de l'eau permettant de recueillir les gaz provenant de cette décomposition. Sachant que 1 coulomb dégage 12 cm^3 d'hydrogène, il suffit de mesurer dans un tube gradué le nombre de centimètres cubes d'hydrogène dégagés par un courant pour avoir le nombre de coulombs qui a passé. On peut même graduer directement en coulombs le tube dans lequel se dégage l'hydrogène.

Dans le deuxième cas, quand on veut évaluer la quantité d'électricité qui se trouve sur un conducteur isolé chargé, on décharge cette électricité à travers le fil d'un galvanomètre balistique. La déviation produite est proportionnelle à la quantité d'électricité qui a passé. Un galvanomètre balistique est un galvanomètre quelconque à équipage mobile assez lourd; la théorie et l'expérience montrent que c'est à cette condition seulement que les quantités d'électricité sont proportionnelles aux élongations, c'est-à-dire à l'amplitude des oscillations qui suivent immédiatement la décharge. Il suffit dès lors, une fois pour toutes, d'étalonner l'appareil en déchargeant dans son circuit une quantité connue d'électricité et observant l'élongation correspondante, pour pouvoir l'utiliser dans toutes les déterminations de quantité d'électricité. On verra, à propos de la capacité des corps, comment on se procure une quantité connue d'électricité, nécessaire à cet étalonnage.

Capacités. — Il est rare que l'on ait à faire des mesures de capacité électrique. Si le cas se produisait voilà comment on opérerait. On chargerait le corps au moyen d'une source électrique déterminée et on le déchargerait à travers un galvanomètre balistique; on lirait la déviation. On ferait la même opération avec un corps de capacité connue en le chargeant au même potentiel, et de la comparaison des deux déviations on déduirait la capacité du premier corps. Par exemple, mettons le corps à étudier en relation avec le pôle positif d'une pile Daniell, dont l'autre pôle est en communication avec la terre; le corps se chargera à un potentiel 1,08 au-dessus de celui de la terre. Il prendra pour cela une quantité d'électricité proportionnelle à sa capacité. Nous le déchargeons dans un galvanomètre balistique et il donne une déviation de 20 divisions. Re commençons avec un corps ayant l'unité de capacité, il nous donnera, par exemple, une déviation de 10 divisions. Il en résultera que, dans les mêmes conditions, le corps étudié prenant deux fois plus d'électricité que le corps

de capacité égale à l'unité, a lui-même deux unités de capacité.

Il faut donc avoir à sa disposition des unités de capacité; elles servent à faire des mesures comme il vient d'être dit; mais elles sont encore beaucoup plus employées pour emmagasiner des quantités variables d'électricité dont on fera usage dans les expériences. Ainsi si l'on veut exciter un nerf ou un muscle avec des quantités d'électricité croissantes, de valeur connue, on prendra des capacités connues, de valeurs croissantes, que l'on chargera à un même potentiel et que l'on déchargera ensuite dans le nerf. Ou bien on prendra une même capacité que l'on chargera à des potentiels variables, dans ce cas encore la quantité croitra avec le potentiel, comme on l'a vu dans l'établissement des formules élémentaires de l'électricité.

Pour avoir des corps de différentes capacités on pourrait prendre des sphères ou d'autres conducteurs isolés sur un pied de verre et de dimensions croissantes. A un moment donné on a opéré ainsi; mais l'on arrive de la sorte à un appareil extrêmement encombrant, d'autant plus que les sphères de diamètre acceptable ont

une capacité beaucoup trop faible pour les besoins habituels. On a alors recours aux condensateurs. Les condensateurs en usage dans les laboratoires ou dans la pratique d'électrothérapie sont constitués par deux feuilles d'étain nommées armatures, séparées par un isolant, mica, papier paraffiné ou autre préparation.

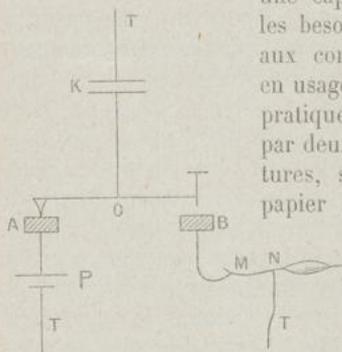


Fig. 488.



Fig. 489.

Une des armatures est mise en communication avec le sol, l'autre en relation avec la source d'électricité. On décharge ensuite cette seconde armature en la mettant en communication avec le corps à électriser, lui-même relié au sol. En général l'expérience est disposée comme l'indique la figure 488. Le condensateur K a une armature reliée à terre T, l'autre armature est reliée à l'axe O d'une clef de Mors. Au repos la clef repose sur un plot A en rela-

lion
Le
la p
der
figu
(
gén
gra
ent
la s
sou
dan
feu
L
fara
cons
sou
nerf
plus
une
Ces
qu'à
toire
Co
sateu
opér
conde
peut
liels
Air
charg
d'elec
formu
conde
poten
même
1, 2,

tion avec le pôle positif d'une pile P dont l'autre pôle est à terre. Le condensateur se charge. Si l'on abaisse la clef, le contact avec la pile est rompu en A, mais il se fait un contact en B et le condensateur se décharge à terre à travers MN, qui dans l'espèce figure le nerf sciatique d'une grenouille.

On sait, d'après ce que l'on trouve dans les traités de physique généraux, que le condensateur a sous un petit volume une très grande capacité. Souvent l'armature en relation avec la terre entoure complètement celle que l'on met en communication avec la source de potentiel (fig. 489), c'est pour cela qu'on les désigne sous le nom d'armature interne et externe. Ce cas se présente dans la bouteille de Leyde; les condensateurs de laboratoire à feuille de mica ou de papier paraffiné sont aussi construits ainsi.

L'unité pratique dont on se sert habituellement est le microfarad, valant $\frac{1}{1\ 000\ 000}$ de farad. C'est déjà une capacité très considérable et les condensateurs des laboratoires sont le plus souvent des divisions décimales du microfarad. Pour exciter des nerfs ou des muscles on emploie $\frac{1}{1\ 000}$, $\frac{1}{100}$ de microfarad, au

plus $\frac{1}{10}$ de microfarad. Mais il est bon d'avoir à sa disposition une série de condensateurs comme on a une série de résistances. Ces séries sont très délicates à établir et il ne faut avoir recours qu'à de bons constructeurs pour les faire faire; dans les laboratoires il y a beaucoup de mauvaises boîtes de condensateurs.

Comme il a été dit plus haut, quand on fait usage de condensateurs pour accumuler différentes quantités d'électricité, on peut opérer de deux manières : ou bien on peut prendre une série de condensateurs que l'on charge au même potentiel, ou bien on peut prendre un même condensateur que l'on charge à des potentiels croissants.

Ainsi, prenons des condensateurs de 1, 2, 3, etc., unités, et chargeons-les à l'unité de potentiel, nous aurons des quantités d'électricité représentées par 1, 2, 3, etc., unités, d'après la formule élémentaire $Q = CV$. Prenons maintenant le premier condensateur d'une unité, et chargeons-le successivement à un potentiel de 1, 2, 3, etc., unités, nous aurons encore, d'après la même formule des quantités d'électricité représentées par 1, 2, 3, etc., unités. Cependant le résultat n'est pas tout à fait le

même. Dans le premier cas nous aurons des quantités d'électricité au même potentiel, dans le second, en même temps que la quantité d'électricité augmentera, le potentiel augmentera aussi. Rappelons que nous avons montré, à propos de la chaleur, qu'une même quantité de chaleur ne jouit pas des mêmes propriétés suivant la température à laquelle elle se trouve; une calorie à 100 degrés ne peut pas donner ce que donne une calorie à 1 000 degrés. De même la quantité d'électricité représentée plus haut par 3 unités n'est pas dans la même condition suivant qu'elle est au potentiel 1 ou au potentiel 3. On démontre que si on décharge les condensateurs à travers un fil, la chaleur dégagée, et par suite l'énergie équivalente, croît avec le carré du potentiel auquel est porté le condensateur.

Dès lors, lorsqu'on accumule de l'électricité sur des condensateurs de capacité croissante, mais à potentiel constant, l'énergie disponible croît, dans le cas envisagé plus haut, comme 1, 2, 3, etc. Si, au contraire, on a un condensateur de capacité constante, quand on fait varier le potentiel pour accumuler successivement des quantités d'électricité croissant comme 1, 2, 3, etc., l'énergie emmagasinée, et qui se libère à la décharge, croît comme 1, 4, 9, etc.

Il n'est donc pas indifférent d'adopter l'une ou l'autre de ces solutions; nous verrons du reste l'importance de ce fait à propos de l'excitation électrique des nerfs et des muscles.

XII

ÉLECTRICITÉ PRODUITE PAR LES ANIMAUX

Si l'on applique sur un tissu deux électrodes reliées à un galvanomètre sensible, on a toujours l'indication d'un courant, à moins de se placer dans des conditions spéciales indiquées plus loin.

Pour être certain que ce courant provient réellement des tissus et non des électrodes, il faut avant tout vérifier que les électrodes appliquées directement l'une contre l'autre ne donnent elles-mêmes lieu à aucune action. Cette condition est plus difficile à réaliser qu'il ne semble au premier abord, aussitôt que l'on fait entrer des liquides dans la construction de ces électrodes. On ne peut dans l'exploration des tissus employer purement et simplement des élec-

trodes métalliques; si on prenait deux fils de platine reliés à un galvanomètre très sensible, aussitôt après le passage du moindre courant dans le circuit, les fils seraient polarisés et toutes les indications seraient faussées. Il se produirait, en plus, au contact du platine et des tissus des altérations qui, quoique légères parfois, donneraient lieu à des erreurs importantes dans des recherches aussi délicates que celles concernant la production de l'électricité par les tissus organisés.

Il faut donc toujours, ceci est absolument indispensable, dans toutes les recherches d'électrophysiologie, ne se servir que d'électrodes construites sur un des types suivants, et dites impolarisables.

On ne peut mettre un liquide quelconque en contact avec les tissus, sans risquer de les altérer, ce contact doit être pris au moyen d'une solution aqueuse de chlorure de sodium de 7 à 10 pour 1 000. D'un autre côté on ne peut mettre le fil métallique relié au galvanomètre en contact direct avec cette solution, il se produirait à ce contact des phénomènes de polarisation. Nous verrons, à propos de l'électrolyse, que pour éviter ces phénomènes de polarisation on doit toujours plonger un métal dans une dissolution d'un sel de ce même métal; par exemple on pourra rattacher le fil du galvanomètre à un bâton de zinc plongeant dans une solution de sulfate de zinc, elle-même en contact avec la solution de chlorure de sodium à l'aide de laquelle on touchera les tissus organisés. La première idée de ces électrodes est due à J. Regnault, et c'est Du Bois-Reymond qui en a fait un usage systématique.

Voici dès lors comment se dispose une expérience, dans ses grandes lignes du moins. Deux lames de zinc pur sont reliées aux deux bornes d'un galvanomètre très sensible. Elles plongent chacune dans un vase contenant une solution concentrée de sulfate de zinc. Sur le bord du vase est appuyé un petit bloc de papier à filtrer imbibé d'une solution de chlorure de sodium à 7 p. 1 000, et c'est sur ce bloc que repose le tissu C à explorer. Si ce tissu est le siège d'une force électromotrice il envoie un courant à travers le galvanomètre, sans qu'aucune polarisation puisse se produire dans le circuit.

Cette forme d'électrodes ne peut servir lorsqu'on veut toucher

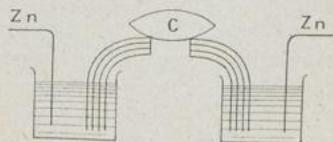


Fig. 490.

un point très localisé d'un organe; on peut alors comme l'indique la figure 491, plonger un petit bâton de zinc pur dans un tube contenant la solution de sulfate de zinc et bouché à la partie inférieure par un tampon d'argile pétrie avec la solution de chlorure de sodium à 7 p. 1 000. Cette argile prend entre les doigts la forme qu'on désire lui donner, il est aisé d'y faire une pointe très effilée, permettant un contact en un point très réduit des tissus. Le principe des électrodes est le même que précédemment; dans

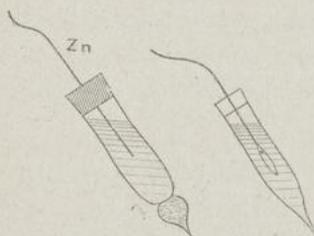


Fig. 491.

Fig. 492.

chaque cas particulier, du reste, on peut, avec un peu d'imagination, trouver la forme la plus appropriée aux expériences. D'Arsonval a proposé un autre modèle consistant simplement en un tube effilé (fig. 492) contenant une solution de chlorure de sodium dans laquelle plonge un petit bâton d'argent recouvert de chlorure d'argent fondu. En principe, comme le métal est en contact avec un de ses sels, il ne doit pas y avoir de polarisation, mais pratiquement il n'en est pas ainsi, ces électrodes ne valent pas les précédentes; cependant, comme elles sont d'une construction facile et d'un emploi très commode, on peut s'en servir dans les expériences où l'on ne cherche pas à atteindre la dernière précision possible. Elles ont aussi l'inconvénient d'avoir une très grande résistance électrique par suite de la couche de chlorure d'argent peu conductrice.

Dans la suite il ne sera plus tenu compte de cette question d'électrodes que l'on supposera toujours très bonnes.

Quand on explore un tissu vivant quelconque, on constate toujours l'existence de courants allant d'une région à l'autre de ces tissus, mais il y a des cas où ces courants se produisent avec une régularité remarquable et répondent à certaines lois qui ont été formulées par Du Bois-Reymond.

Muscles et nerfs. — Considérons un muscle à fibres parallèles entre elles et découpons-y un prisme par deux sections perpendiculaires aux fibres; en appliquant une électrode sur la face latérale et une autre électrode sur une des bases, nous constaterons l'existence d'un courant allant dans le galvanomètre de la surface

latérale
que
de se
un co
comp
comm
à dépl
on co
le mè
points
Le po
milieu
le lon
le pou
bases,
est au
peut r
ment l
tiel à
figure
Cett
sont p
ment à
réparti
on pre
gastro
détail;
d'énon
Si,
termin
prisme
pareil
de man
lument
muscle
maxim
du nerf
dier la
très pe
comme

latérale à la base comme le représente la figure 493. Il en résulte que dans l'intérieur du muscle le courant doit aller de la surface de section à la surface latérale. Ce prisme musculaire donne donc un courant comme le ferait une pile, la section transversale se comportant comme le zinc et la surface latérale se comportant comme le pôle positif, cuivre, platine, charbon, etc. Si l'on vient à déplacer les électrodes sur la base ou sur la surface latérale, on constate que l'intensité du courant varie, le potentiel n'est pas le même en tous les points de la surface latérale ou en tous les points de la surface de section.

Le potentiel maximum est au milieu de la surface latérale le long d'une ligne tracée sur le pourtour parallèlement aux bases, le potentiel minimum est au milieu de ces bases. On peut représenter schématiquement les distributions de potentiel

à la surface du prisme musculaire comme on l'a fait sur la figure 494.

Cette distribution symétrique varie quand les deux bases ne sont plus coupées perpendiculairement aux fibres, mais obliquement à ces fibres. Il n'y a pas lieu ici d'insister sur ce point. La répartition des potentiels devient encore plus compliquée quand on prend un muscle à fibres non parallèles entre elles comme le gastrocnémien de la grenouille, mais ce sont là des questions de détail; il faut surtout retenir les gros faits que nous venons d'énoncer.

Si, au lieu de prendre un muscle, on prend un nerf et qu'on le termine par deux sections, on a un prisme nerveux analogue au prisme musculaire envisagé précédemment. On constate qu'un pareil prisme nerveux est le siège de manifestations électriques absolument comparables à celles des muscles. C'est-à-dire qu'il y a un maximum de potentiel au milieu du nerf. Il est assez difficile d'étudier la répartition du potentiel sur les bases généralement très petites. Il résulte de cette distribution des potentiels, que, comme pour le muscle, en appliquant une électrode sur la surface

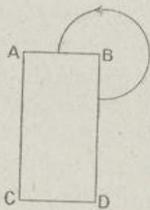


Fig. 493.

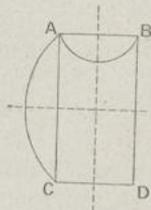


Fig. 494.

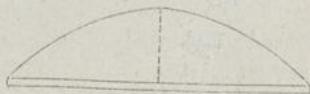


Fig. 495.

latérale du nerf et une électrode sur la base on a un courant allant dans le galvanomètre de la surface latérale à la base.

Remarquons encore que si, soit sur un muscle, soit sur un nerf, on vient à placer deux électrodes de façon qu'elles ne soient pas à même distance du milieu de la surface latérale ou du milieu de la base, on aura un courant pour lequel il est facile de prévoir dans chaque cas la direction et même de se faire une idée de son intensité relative. Le plus fort courant aura lieu quand les électrodes seront en A et B (fig. 496), il ira dans le galvanomètre de B en A. Si les deux électrodes sont sur la base en C et D, le courant ira du point C, le plus éloigné du milieu A, au point D, le plus rapproché. Si les deux électrodes sont sur la surface latérale en E et F, le courant ira du point E, le plus rapproché du milieu B, au point F, le plus éloigné de ce point. Cela résulte de la distribution même des potentiels.

D'après Du Bois-Reymond, il faudrait aussi considérer comme sections transversales des muscles les surfaces d'insertion sur les tendons, de sorte qu'en prenant un muscle entier muni de tendons à ses extrémités, et plaçant une électrode sur la surface latérale de ce muscle, l'autre sur le tendon, on a un courant allant de la première à la seconde dans le circuit extérieur. Sur tout muscle on constatera un courant, à moins que les deux électrodes ne soient précisément placées en deux points de même potentiel.

Les phénomènes que l'on vient d'étudier sont connus sous le nom de courants de repos, c'est-à-dire qu'ils se manifestent en dehors de toute excitation portée sur le nerf et de toute contraction du muscle. Mais les choses vont changer aussitôt que les organes entrent en activité.

Appliquons sur un muscle quelconque, le gastrocnémien de la grenouille convient très bien à cette expérience, deux électrodes impolarisables E, E', reliées aux bornes d'un galvanomètre G très sensible (fig. 497). Nous observerons une déviation. Portons maintenant sur le nerf innervant ce muscle, au moyen de deux électrodes quelconques A et B, l'excitation produite par le courant alternatif d'une bobine d'induction. Le muscle entrera en tétanos, il se raccourcira et en même temps on verra la déviation du galvanomètre diminuer, ce qui indique un amoindrissement du courant primitif. Ce courant a subi, suivant l'expression de Du Bois-Reymond, l'oscillation négative.

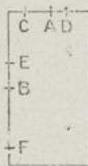


Fig. 496.

La
(fig. 4
l'une
son pa
tenant



d'indu
analog

Du B
ancien
voici co

La même oscillation négative se met en évidence sur le nerf (fig. 498). Si l'on applique sur un nerf excisé, deux électrodes, l'une au voisinage de la section terminale, l'autre en un point de son parcours, on a, comme on sait, un courant de repos. Si maintenant, à l'aide des deux électrodes A et B reliées à une bobine

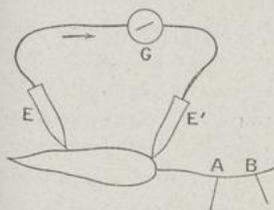


Fig. 497.

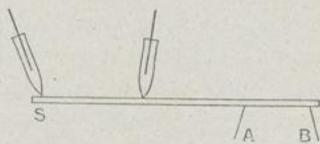


Fig. 498.

d'induction, on tétanise le nerf, on observe une oscillation négative analogue à celle que nous avons signalée plus haut pour le muscle.

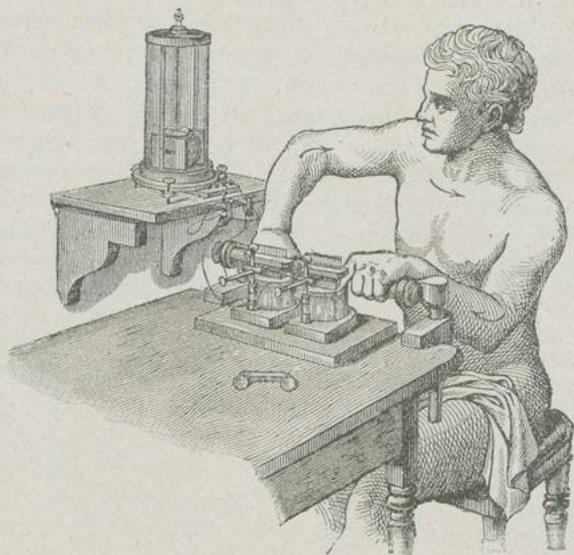


Fig. 499.

Du Bois-Reymond a, par une expérience célèbre et déjà très ancienne, essayé de montrer l'oscillation négative sur l'homme : voici comment il opérerait pour cela. Deux cristallisoirs contenant

de l'eau salée sont en communication avec un galvanomètre par des électrodes impolarisables (fig. 499). Le sujet plonge les doigts de la main droite dans un des cristallisoirs et les doigts de la main gauche dans l'autre; on a en général ainsi une très petite déviation, par suite de légères inégalités des deux côtés, tenant à diverses causes qu'il est difficile de préciser. Ceci fait, on contracte aussi fortement que possible un des bras, aussitôt on voit le galvanomètre accuser une déviation correspondant à un courant allant de la main à l'épaule dans le bras contracté.

Malheureusement cette expérience était loin d'être probante. On peut lui faire diverses objections, dont une des plus graves est que, par suite de la contraction, la circulation, les sécrétions de la peau, etc., sont modifiées et que c'est à ces modifications qu'il faut attribuer le courant. La démonstration rigoureuse de l'oscillation négative chez l'homme n'a été faite que plus tard par L. Hermann.

Du Bois-Reymond a cherché à expliquer les divers phénomènes de l'électricité animale par une théorie, dans laquelle il supposait les tissus composés de particules chargées en leur diverses parties soit négativement, soit positivement; les particules étaient normalement orientées de façon à tourner leurs couches négatives vers les extrémités du muscle ou du nerf et leurs couches positives vers les parties latérales. Au moment de l'excitation, l'entrée en activité du nerf ou du muscle serait accompagnée d'une rotation de ces particules amenant une autre distribution des surfaces chargées positivement et négativement, et par suite un changement dans les courants obtenus en reliant à travers le galvanomètre deux points de la surface du muscle.

Telle est, résumée rapidement, la théorie dite moléculaire de Du Bois-Reymond; aujourd'hui elle n'est pour ainsi dire plus adoptée par personne, et est remplacée par la théorie de l'altération de L. Hermann.

D'après ce savant, et la plupart des travaux exécutés depuis lui confirment cette manière de voir, un muscle ou un nerf complètement intact ne présenterait aucune différence de potentiel en ses divers points, et par suite ne donnerait aucun courant quand on lui applique deux électrodes reliées aux bornes d'un galvanomètre sensible. La difficulté est de faire les préparations sans altérer en aucune façon les tissus, sans les blesser, sans les toucher avec un liquide nocif. A ce point de vue, le suc musculaire

acidifi
partic
Aus
devien
l'expé
ou d'u
nerf d
Mais i
moind
l'expé
pour
certain
travers
ces rec
est le
résulta
seur d
ralem
pas de
par rap
passan
au poin
Qua
excités
devien
riences
quées s
étant a
tion S,
latérale
face lat
tion est
donc l'é
négativ
placée
mainten
transme
qu'une
l'était,
rant all

acidifié au contact de l'air, les sécrétions de la peau, etc., sont particulièrement à craindre.

Aussitôt qu'en un point il se produit la moindre lésion, ce point devient négatif par rapport aux autres régions du tissu soumis à l'expérience. C'est ce qui explique pourquoi la section d'un nerf ou d'un muscle est négative; aussitôt cette opération effectuée, le nerf ou le muscle commencent à s'altérer aux points entamés. Mais il n'est pas nécessaire d'un traumatisme aussi brutal, la moindre action nocive suffit pour donner lieu à un courant, aussi l'expérience est-elle difficile à bien réussir. On a vainement tenté, pour résoudre la question par une expérience cruciale, et être certain de ne pas endommager les muscles, de les explorer à travers la peau, mais chez la grenouille, animal de choix pour ces recherches, et du reste chez les autres animaux aussi, la peau est le siège de forces électromotrices spéciales venant troubler les résultats, et dues aux diverses glandes se trouvant dans l'épaisseur de cette peau. Quoi qu'il en soit, le fait est considéré généralement comme établi; un muscle ou un nerf intact ne donne pas de courant; s'il est lésé en un point, ce point devient négatif par rapport au reste de l'organe, c'est-à-dire que dans un circuit passant par le galvanomètre le courant va des régions intactes au point altéré.

Quand l'organe, nerf ou muscle, entre en activité, les points excités se comportent comme des points altérés, c'est-à-dire qu'ils deviennent négatifs. Ceci permet d'expliquer les diverses expériences précédentes. Prenons deux électrodes impolarisables appliquées sur un nerf excisé, l'une étant au voisinage de la section S, l'autre sur la surface latérale L (fig. 500). Cette surface latérale est intacte la section est le siège d'une lésion, donc l'électrode placée en S est négative par rapport à celle placée en L, le courant va dans le galvanomètre de L à S. Faisons maintenant en AB une excitation tétanique. Cette excitation se transmet dans tout le nerf, et y produit partout le même effet qu'une lésion. Il en résulte que L va devenir plus négatif qu'il ne l'était, se rapprocher de l'état électrique de S et par suite le courant allant de L à S va diminuer d'intensité.

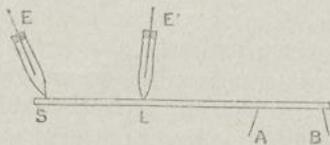


Fig. 500.

La même explication est directement applicable au muscle.

L'oscillation négative telle qu'elle vient d'être décrite est facile à observer aujourd'hui grâce à la qualité des instruments que nous possédons; l'expérience devient beaucoup plus délicate quand au lieu de faire en AB une excitation tétanique prolongée dont la durée permet au galvanomètre de prendre son équilibre correspondant à l'affaiblissement du courant de repos, on ne fait qu'une excitation brève.

Supposons que les choses étant installées comme le représente la figure 500, les électrodes EE' étant reliées au galvanomètre, dont la déviation indique un courant de repos, on vienne à envoyer par AB une petite décharge électrique très brève. Le nerf sera excité en AB pendant un temps très court, on ne verra aucun changement au galvanomètre: cela tient-il à ce qu'il ne s'est produit aucun changement dans le nerf ou à ce que le galvanomètre donne des indications trop lentes pour suivre une variation négative fugitive du courant de repos?

Des expériences très délicates ont montré que c'est à cette dernière hypothèse qu'il faut s'arrêter et l'on a pu, par des méthodes convenables, mettre en évidence l'oscillation négative très courte consécutive à une excitation très brève. On a pu constater aussi que cette oscillation négative se produit un certain temps après l'excitation avec un retard d'autant plus grand que AB est plus éloigné de l'électrode L.

Voici comment on explique ces faits: l'excitation portée en AB se propage le long du nerf comme une onde à la surface de l'eau; quand elle passe sous L, L devient négatif, ainsi qu'on l'a vu plus haut. A ce moment l'oscillation négative du courant de repos se produit, puis l'onde ayant passé, le courant de repos reprend sa valeur primitive. En faisant une série d'expériences avec des valeurs différentes de la distance de AB à L on peut mesurer la vitesse de propagation de l'excitation le long du nerf. Les auteurs qui ont fait ces expériences ont retrouvé la vitesse de propagation de l'influx nerveux mesurée par les méthodes qui seront indiquées ultérieurement.

Répétons la même opération avec un nerf intact. Nous savons qu'en appliquant les électrodes EE' sur le nerf intact nous ne constatons aucun courant. Produisons en AB (fig. 501) une excitation très brève, nous observerons deux oscillations électriques successives très courtes, l'une allant, dans l'appareil indicateur, de

l'éle
est e
Hern
au m
néga
et no
mière
dans
de E
E' es
primi
sous l
onde
nomm
Ces

vées a
capillai
se dépl
ces me
plaque
figure
cœur d
enregis
noire. S
l'électro
par la f
Ces var
s'enregi

l'électrode E à E' et la seconde marchant en sens inverse. Ceci est encore très facile à expliquer et vient à l'appui de la théorie de Hermann. L'excitation faite en AB s'est propagée le long du nerf; au moment où elle a passé sous E', l'électrode E' est devenue négative par rapport à E, et nous avons vu la première onde électrique allant dans le circuit extérieur de E à E'. Aussitôt après, E' est revenu à son état primitif, et l'onde passant

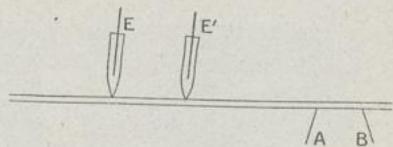


Fig. 501.

sous E c'est E qui est devenu négatif par rapport à E'; la seconde onde s'est produite inverse de la première. C'est ce que l'on nomme le phénomène de l'oscillation diphasique.

Ces oscillations électriques, trop rapides pour pouvoir être obser-

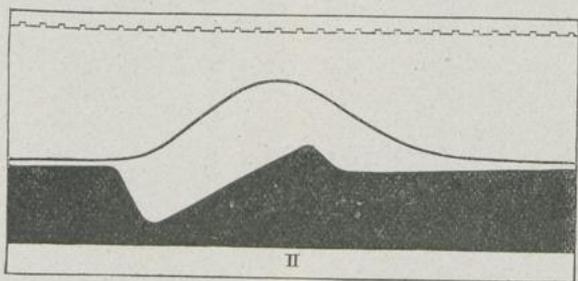


Fig. 502.

vées au galvanomètre, se mettent en évidence avec l'électromètre capillaire de Lippmann, qui est très sensible et dont le ménisque se déplace avec une grande rapidité. Comme l'œil ne pourrait suivre ces mouvements, on photographie la colonne capillaire sur une plaque mobile et l'on obtient des tracés analogues à ceux de la figure 502. Cette figure représente les variations électriques d'un cœur de grenouille battant spontanément. Les battements ont été enregistrés avec un cardiographe, ils sont représentés par la ligne noire. Simultanément on a photographié la colonne de mercure de l'électromètre et les déplacements du ménisque sont représentés par la ligne de séparation de la zone blanche et de la zone noire. Ces variations électriques du cœur battant spontanément peuvent s'enregistrer sur l'animal absolument normal ou sur l'homme, il

suffit de placer une des électrodes du côté de la base du cœur, l'autre du côté de la pointe et de les relier à un électromètre enregistreur.

Depuis l'invention du galvanomètre à corde par Einthoven, ce



Fig. 503. — Normal.

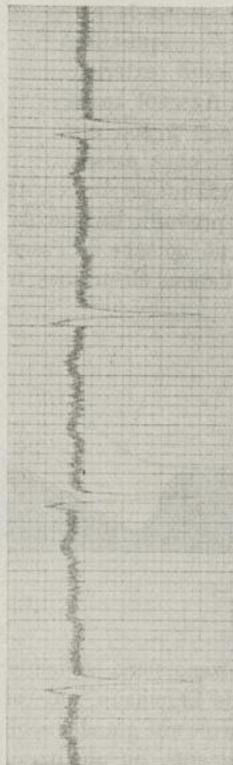


Fig. 504. — Insuffisance aortique.

physiologiste a employé son appareil, à la place de l'électromètre capillaire, pour enregistrer divers phénomènes électriques. En particulier il s'en est servi pour prendre des tracés des variations électriques du cœur. Il suffit pour cela de relier les bornes du galvanomètre à deux vases contenant de l'eau salée dans laquelle le sujet plonge les mains. Les oscillations électriques du cœur se transmettent par les bras jusqu'au galvanomètre. Les tracés ci-dessus montrent les différences que l'on observe entre l'état normal et divers états pathologiques (fig. 503, 504, 505, 506).

exem
state
temps
négat
consi
les m
quée
const
(fig.
nerf.
Si,
succes

Nous devons encore signaler quelques points à propos de l'oscillation négative du nerf.

En premier lieu, si dans l'expérience de la figure 500, l'on répète l'excitation du nerf périodiquement à intervalle d'une minute par

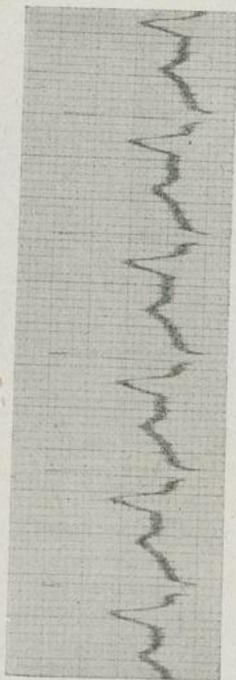


Fig. 505. — Rétrécissement mitral.

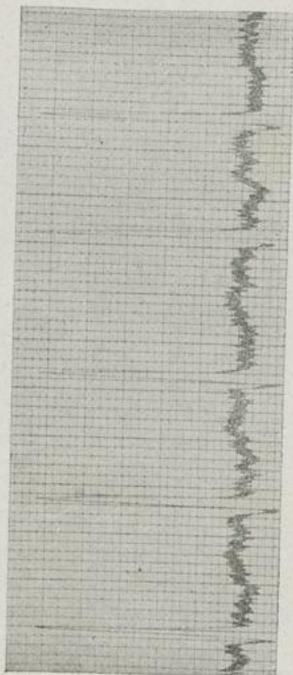


Fig. 506. — Insuffisance mitrale.

exemple, et que l'on enregistre les oscillations négatives, on constate que la grandeur de ces oscillations reste constante pendant un temps fort long (fig. 507, bas); si on admet que cette oscillation négative est liée à l'état d'activité du nerf, il en résulte qu'il faut considérer le nerf comme très résistant à la fatigue. Lorsque dans les mêmes conditions on inscrit au myographe la secousse provoquée dans un muscle par l'excitation de son nerf moteur, on peut constater que cette secousse diminue rapidement de hauteur (fig. 507, haut), c'est le muscle qui s'est fatigué, mais non pas le nerf.

Si, pendant que l'on prend le tracé des oscillations négatives successives du nerf, on fait agir sur ce nerf des vapeurs d'éther

ou de chloroforme, on constate que ces oscillations négatives disparaissent, pour reparaitre après soustraction des vapeurs, quand toutefois leur action n'a pas été trop énergique ou trop prolongée. L'acide carbonique en très faible quantité produit une augmenta-

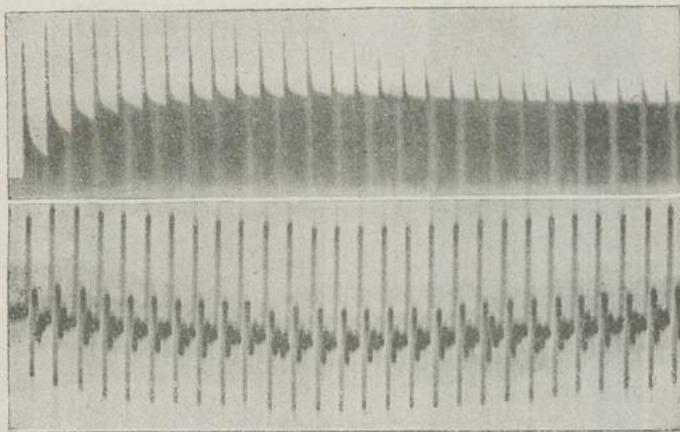


Fig. 507.

tion de l'oscillation négative; à haute dose, il agit comme l'éther et le chloroforme.

Glandes. Œil. Centres nerveux. — Parmi les autres organes donnant lieu à des manifestations électriques régulières il faut d'abord citer les glandes. En particulier si l'on explore la peau on la trouve toujours traversée par un courant allant de l'extérieur vers l'intérieur, tenant à la présence des glandes cutanées. Ce courant est modifié quand on fait une excitation.

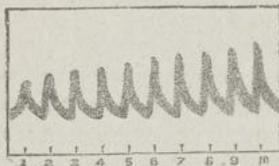


Fig. 508.

De même la rétine est le siège d'oscillations électriques quand on l'illumine (fig. 508).

Les centres nerveux manifestent aussi leur état d'activité par des variations électriques dans le détail desquelles il n'y a pas lieu d'entrer ici.

Poissons électriques. — On sait depuis fort longtemps que certains poissons, en particulier les gymnotes, torpilles, malaptérures, donnent quand on les touche des secousses électriques extrêmement énergiques. Ces phénomènes ont été étudiés par

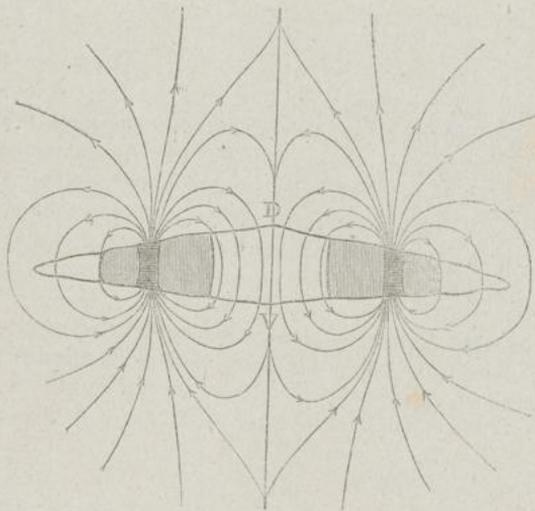


Fig. 509.

beaucoup de physiologistes, depuis que ces manifestations ont paru avoir une grande analogie avec les phénomènes électriques du muscle, à l'intensité près, bien entendu.

Quand l'on prend une torpille, dont la section transversale est représentée sur la figure 509, on constate que la secousse qu'elle

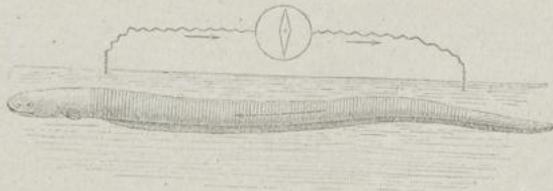


Fig. 510.

donne provient d'une décharge allant, dans le circuit extérieur, du dos au ventre. Chez le gymnote la décharge va de la tête à la queue (fig. 510).

Ces décharges se produisent avec une certaine période latente évaluée à 0^o,005 environ, par conséquent de même ordre que celle du muscle lors de sa contraction.

Elles sont dues à un organe spécial dit organe électrique, et peuvent être assez intenses, comme l'a montré d'Arsonval, pour allumer de petites lampes électriques.

Ce qui fait l'intérêt de ces organes électriques au point de vue de la physiologie générale, c'est leur analogie avec le muscle au point de vue embryologique. Au cours du développement le muscle est devenu un organe fournissant du travail mécanique avec faibles manifestations électriques, tandis que les termes se sont inversés pour l'organe électrique. Il se peut que l'étude parallèle de ces deux espèces d'organes vienne un jour jeter une lumière nouvelle sur leur fonctionnement.

Plantes électriques. — Disons seulement en passant que les plantes donnent aussi lieu à des manifestations électriques, comme tous les êtres vivants.

XIII

ACTIONS CHIMIQUES DU COURANT

On sait que si l'on fait passer un courant électrique dans de l'eau acidulée, en y plongeant deux fils de platine reliés à la pile, il y a décomposition du liquide avec dégagement d'hydrogène au pôle négatif et d'oxygène au pôle positif. Ce phénomène nommé électrolyse joue un rôle considérable dans un grand nombre d'applications de l'électricité. Les fils qui servent à amener le courant au corps soumis à l'action du courant se nomment les électrodes; on les distingue en électrode positive ou Anode et en électrode négative ou Cathode.

L'électrolyse est accompagnée de ce que l'on nomme la polarisation des électrodes; voici en quoi consiste ce phénomène. Si l'on fait passer un courant continu dans de l'eau acidulée par l'acide sulfurique, au moyen d'une

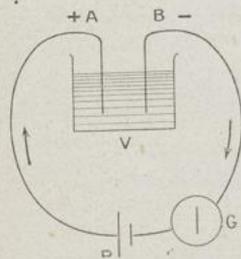


Fig. 511.

pile reliée à deux électrodes de platine A et B, en plaçant dans le circuit un galvanomètre G (fig. 511), on constate une certaine déviation de ce galvanomètre correspondant à un courant circulant dans le sens des flèches indiquées sur la figure. En même temps l'hydrogène se dégage sur B et l'oxygène sur A. Si l'on connaissait la résistance du circuit et la force électromotrice de la pile, on pourrait calculer l'intensité du courant, et l'on constaterait que cette intensité calculée est supérieure à celle indiquée par le galvanomètre. Cela tient à ce que le voltamètre V est devenu le siège d'une force électromotrice agissant en sens inverse de la pile; cela est facile à vérifier. Il suffit pour cela de supprimer la pile en laissant toutes les autres connexions en état, et de fermer le courant à l'endroit où se trouvait cette pile, pour constater une déviation du galvanomètre indiquant un courant de sens contraire au précédent, c'est-à-dire circulant en sens inverse des flèches. C'est le courant de polarisation. Ce même phénomène de polarisation se produit dans les piles quand il s'y dégage des gaz. C'est aussi sur lui que sont basés les accumulateurs, qui ne diffèrent en principe du voltamètre simple qui vient d'être considéré, que par la substitution du plomb au platine, l'expérience ayant démontré que le plomb a une plus grande capacité de polarisation que le platine.

Si au lieu de faire passer le courant dans de l'eau acidulée, on le fait passer dans une solution saline, par exemple dans du sulfate de cuivre, on constate du côté négatif un dépôt de cuivre et du côté positif une accumulation d'acide sulfurique avec dégagement d'oxygène. Nous aurons encore de la polarisation; pour que cette polarisation n'ait pas lieu il faut que le courant ne modifie pas la nature des électrodes; cela aura lieu quand nous prendrons une solution de sulfate de cuivre et des électrodes en cuivre par exemple. Alors il y aura du côté négatif dépôt de cuivre, du côté positif attaque du cuivre par l'oxygène et l'acide sulfurique avec formation de sulfate de cuivre; rien ne sera changé, ni à la solution ni aux électrodes, sinon qu'une certaine quantité de métal aura été transportée de l'électrode positive à l'électrode négative. On aura le même résultat chaque fois que l'on emploiera des électrodes d'un certain métal plongeant dans une solution saline du même métal; électrodes de zinc dans une solution de sulfate de zinc, électrodes d'argent dans une solution d'azotate d'argent, etc.

Lois de Faraday. — Faraday a montré qu'il y a des relations très étroites entre l'intensité du courant et les décompositions se produisant dans les liquides traversés par ce courant. Voici le fait le plus important, *qu'il y a lieu de retenir avant tout* :

La quantité de corps décomposé et par suite de corps déposé à chaque électrode est proportionnelle au temps de passage du courant et à l'intensité de ce courant. Elle dépend d'ailleurs de la nature du corps décomposé.



Fig. 512.

Prenons par exemple un voltamètre à eau acidulée et faisons-y passer un courant, nous constaterons, en mettant dans le circuit un galvanomètre, que, dans le même temps, les quantités de gaz dégagés sont proportionnelles aux intensités du courant. Bien entendu, pour faire cette opération il faut disposer le voltamètre de façon à pouvoir recueillir les gaz, c'est-à-dire faire venir les électrodes par le fond du vase et les coiffer par des éprouvettes où le gaz sera maintenu au-dessus du liquide (fig. 512).

Quand on change les dimensions du vase, la surface des électrodes, la position du voltamètre dans le circuit, en le mettant plus ou moins près du pôle négatif de la pile ou du pôle positif, on constate que toutes ces modifications n'ont aucune influence sur la quantité de gaz dégagé; *pour une même intensité de courant et une même durée de passage, la grandeur de l'électrolyse est la même.*

Lorsque l'intensité du courant est réduite à moitié et que la durée de passage double, on aura la même électrolyse; *d'une façon générale cette électrolyse restera constante quand le produit de l'intensité par la durée sera le même, ce qui revient à dire que la même quantité d'électricité aura passé dans le circuit.*

Si donc on veut décomposer par électrolyse une certaine quantité de corps, ou, ce qui revient au même, dégager à l'une des électrodes un certain volume de gaz, ou bien déposer un poids déterminé de métal, il n'y a à tenir compte que de la quantité d'électricité débitée par le courant, *c'est là le fait important.*

Quand on examine le poids de corps déposé à une électrode, en faisant varier la nature de la solution et maintenant constante la quantité d'électricité qui passe dans le circuit, on trouve que ce poids varie suivant ce que l'on nomme l'équivalent électrochi-

mique du corps. Ces équivalents électrochimiques se trouvent dans des tables spéciales; il est d'ailleurs rare que leur connaissance soit utile dans la pratique d'électrothérapie ou en électro-physiologie.

Il arrive parfois que les corps mis en liberté aux électrodes donnent lieu à ce que l'on appelle des actions secondaires. Si nous décomposons une solution de sulfate de cuivre, le sel se sépare en cuivre qui se dépose sur l'électrode négative et en radical acide qui va à l'électrode positive. Ce radical acide donne lieu à un dégagement d'oxygène, pour reformer avec l'eau de l'acide sulfurique. En répétant la même opération avec du sulfate de soude on retrouve les mêmes phénomènes du côté de l'anode, mais à la cathode le sodium mis en liberté réagit sur l'eau pour donner de la soude avec dégagement d'hydrogène. Il semble donc finalement qu'il y ait séparation du sel en acide d'un côté et en base de l'autre. Des actions secondaires analogues se produiront chaque fois que les corps mis en liberté aux électrodes pourront réagir soit sur l'eau, soit sur le métal de ces électrodes, et l'on n'observera que le résultat de ces actions secondaires.

Électrolyse interpolaire. — En général, quand on fait passer un courant électrique dans un liquide à l'aide d'électrodes qui y plongent, les produits de décomposition n'apparaissent, comme on sait, que sur les électrodes; dans l'intervalle qui les sépare le liquide ne subit aucune modification apparente. Il n'en est plus de même lorsque le parcours de l'anode à la cathode n'est pas homogène. Supposons que nous superposions, grâce à une différence de densité, deux liquides conducteurs sans action l'un sur l'autre en temps ordinaire, nous avons entre les deux liquides une surface de séparation horizontale AB (fig. 513). Faisons maintenant passer un courant par deux électrodes situées l'une à la partie inférieure, l'autre à la partie supérieure du vase contenant les liquides, il pourra se produire des changements remarquables à la surface de séparation des deux liquides. A la partie inférieure nous avons, par exemple, une solution saturée de sel marin; au-dessus, de l'eau de fontaine, le tout étant coloré par du tournesol. Quand le courant passera de haut en bas, comme dans le cas de la figure 513, le tournesol virera au rouge en AB, indiquant la mise en liberté d'un acide. Quand le courant passera en sens contraire il virera au bleu indiquant la mise en liberté

d'une base. Des actions analogues se passeront toujours quand le courant traversera la surface de séparation de deux liquides contenant en solution des sels différents. Ces décompositions donnent lieu à des phénomènes de polarisation analogues à ceux que nous avons observés dans l'électrolyse d'un seul liquide; il est facile de les mettre en évidence. Si, après avoir électrolysé un liquide unique, homogène, on change d'électrodes, on constate qu'il n'y a plus aucune polarisation, un galvanomètre mis dans le circuit de ces nouvelles électrodes ne subit aucune déviation. Mais quand on répète la même expérience avec un liquide hétérogène;

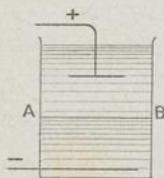


Fig. 513.

quand, après avoir fait passer le courant on retire les électrodes, pour les remplacer par des électrodes neuves, il se produit encore un courant de polarisation dont l'origine ne peut résider que dans les actions électrolytiques ayant eu lieu à la surface de séparation AB.

XIV

ROLE DES IONS DANS L'ÉLECTROLYSE ET LA CONDUCTIBILITÉ DES SOLUTIONS

L'hypothèse des Ions permet d'expliquer d'une façon très simple et très satisfaisante tous les phénomènes relatifs à la conductibilité des solutions et à l'électrolyse.

Dissolvons dans l'eau une certaine quantité d'acide chlorhydrique par exemple, et soumettons ce liquide à l'électrolyse; nous verrons apparaître H sur l'électrode négative et Cl sur l'électrode positive.

On explique cela en disant que HCl s'est ionisé en donnant des Ions H électrisés positivement ou électro-positifs et des Ions Cl électrisés négativement ou électro-négatifs. Les Ions H sont attirés par l'électrode négative comme une balle de sureau chargée positivement l'est par un corps chargé négativement. Au moment où les Ions H viennent au contact de la cathode ils perdent leur charge et se dégagent à l'état d'hydrogène. De même pour les Ions Cl à l'anode. A mesure que les ions disparaissent ainsi, une nouvelle quantité du corps en solution s'ionise. C'est grâce à cette circulation des Ions que se fait le transport de l'électricité

à travers la solution, aussi les corps qui ne s'ionisent pas, comme le sucre de canne ou la glycérine ne donnent-ils pas de solutions conductrices.

XV

PHÉNOMÈNES D'ENTRAÎNEMENT

Le courant électrique traversant un liquide entraîne ce liquide. Voici comment peut se faire l'expérience. Dans un vase pouvant être séparé en deux par une cloison poreuse P, on met une solution de sulfate de cuivre. Elle tend à se mettre au même niveau de part et d'autre de la paroi. Si maintenant, à l'aide d'électrodes en cuivre placées comme l'indique la figure 514, on fait passer un courant dans le liquide, on constate que le niveau s'élève du côté de l'électrode négative, le liquide est donc entraîné par le courant à travers la paroi poreuse. Ce phénomène est d'autant plus accentué que l'intensité du courant est plus grande.

Voici une autre forme sous laquelle se fait sentir l'entraînement des corps par le courant. Quand un courant traverse une solution saline, les sels sont entraînés par le courant dans le liquide, ainsi un sel se trouvant dans la solution en quantité très faible, ne prendra pas part à l'électrolyse, il ne sera pas décomposé, mais simplement entraîné d'une électrode vers l'autre. Les phénomènes

d'entraînement sous l'influence du courant ne se manifestent pas seulement dans les liquides, on peut les mettre en évidence dans la gélatine ou d'autres substances analogues, et l'expérience devient très frap-

pante si l'on emploie des corps colorés comme les couleurs d'aniline dont l'on peut suivre la marche. On verse de la gélatine fondue dans un tube en U, et une fois la prise faite par refroidissement on renverse le tube sur deux godets contenant une couleur d'aniline en solution et dans lesquels plongent les électrodes servant à amener le courant. On constate alors que la matière

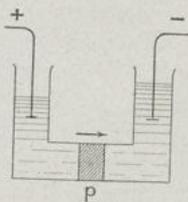


Fig. 514.

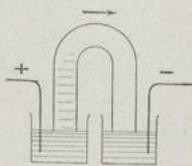


Fig. 515.

colorante est entraînée; même pour un courant de très faible intensité elle monte très rapidement dans une des branches du tube. Suivant la nature de cette matière colorante, on la voit marcher dans le sens du courant ou en sens inverse.

Ce phénomène a déjà été signalé à propos de l'état colloïdal.

XVI

ACTION DU COURANT CONTINU
SUR LES TISSUS ORGANISÉS

Quand on applique le courant continu au corps humain ou que, d'une façon générale, on le fait agir sur des tissus organisés, on ne doit jamais perdre de vue les phénomènes d'électrolyse et d'entraînement qui peuvent se produire.

En premier lieu nous devons envisager les actions qui se produisent au contact des électrodes. Suivant les circonstances, il y aura lieu d'éviter ces actions ou de les favoriser en les utilisant. On cherchera à les éviter toutes les fois que l'on voudra faire traverser les tissus par un courant avec le minimum d'altérations; au contraire, on les favorisera quand on voudra faire des cautérisations locales au moyen des produits acides ou basiques mis en liberté au contact des électrodes et des liquides qui imprègnent les tissus de l'organisme. Dans ce dernier cas on placera des électrodes métalliques en contact direct avec les tissus en leur donnant la forme la plus convenable au but que l'on veut atteindre. Quelques exemples sont bons à citer. On rencontre souvent de petites tumeurs vasculaires qu'il est fort aisé de faire disparaître sans cicatrices appréciables au moyen d'un traitement électrolytique; pour cela on cherche à dégager à l'intérieur de ces tumeurs un acide qui donne lieu à la coagulation du sang et à l'oblitération des vaisseaux. En s'y prenant convenablement, on finit par supprimer toute la circulation dans ces tumeurs qui se réduisent et s'atrophient peu à peu; avec un peu d'adresse et de patience, on arrive à d'excellents résultats. Pour obtenir le dégagement acide on enfonce dans la tumeur une ou plusieurs aiguilles en or, isolées sur la plus grande partie de leur longueur, sauf une petite portion de la pointe qui reste nue. Cela étant, on fait passer le courant en se servant de ces aiguilles comme d'électrodes positives

par lesquelles le courant pénètre dans le corps, tandis qu'il sort par une vaste électrode, dite électrode indifférente, dont nous parlerons plus loin. Si l'on place un galvanomètre dans le circuit, ce qu'il ne faut pas manquer de faire, on peut exactement doser l'effet chimique produit. Avec un peu d'habitude ce genre d'opérations s'exécute avec la plus grande précision. Il faut veiller à ce que les aiguilles soient bien vernies comme il a été dit, afin d'éviter le contact du métal avec la peau. En prenant une aiguille nue l'électrolyse se produit sur toute la longueur de cette aiguille en contact avec les tissus, et il en résulte une eschare de la peau. Quand, au contraire, ce n'est que la pointe, profondément enfoncée

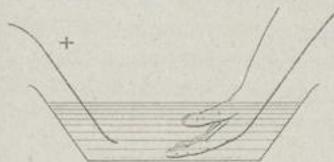


Fig. 516.

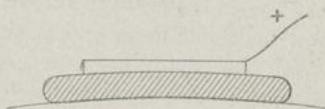


Fig. 517.

sous la peau, qui est le siège de l'électrolyse, la peau reste saine, et après avoir retiré l'aiguille il ne persiste qu'un petit trou sans importance qui s'oblitére rapidement.

Voici un autre cas. On introduit dans la cavité utérine, non plus une petite aiguille mais une tige de platine de 4 à 5 mm. de diamètre, ou encore une électrode allongée en charbon cornue de diamètre plus ou moins grand suivant l'état de dilatation du col, et on s'en sert comme d'anode, la cathode étant toujours une électrode indifférente. On produit ainsi à l'intérieur de la cavité utérine une électrolyse avec dégagement d'acides et d'ozone; cela donne lieu à une cautérisation de la muqueuse et à une désinfection de cette cavité utérine par les antiseptiques énergiques provenant de l'électrolyse.

Le plus souvent, quand on veut utiliser les actions chimiques aux électrodes, c'est l'anode que l'on emploie, comme dans les cas qui viennent d'être cités; parfois cependant on fait usage de la cathode, on a alors une cautérisation par les bases qui y sont mises en liberté.

Lorsqu'on ne veut pas avoir d'action locale aux électrodes, il faut se garder de toucher la peau avec un conducteur métallique, bien entendu quand on opère avec le courant continu. Le contact

idéal se fait avec de l'eau salée, ou même de l'eau de fontaine qui n'altère pas les objets en contact avec elle. Le dispositif le meilleur se réalise aisément lorsqu'il s'agit de faire entrer le courant par une main ou un pied; on plonge cette main ou ce pied dans une cuvette contenant de l'eau à laquelle aboutit l'électrode (fig. 516). Dans ces conditions, il ne peut y avoir d'électrolyse à la surface de la peau, on ne risque aucune cautérisation ni brûlure. Lorsqu'on ne peut employer ce procédé, quand il faut faire pénétrer ou sortir le courant par une région du dos ou de l'abdomen, on étend sur cette région des linges, de l'amadou, du feutre, ou d'autres substances capables d'absorber de l'eau; on les imbibé soigneusement de liquide, et par-dessus on met une plaque de métal reliée au pôle de la pile. Ces prises de contact se nomment des *électrodes indifférentes*. Plus leur surface est grande et moins on risque la cautérisation de la peau, la faible action chimique qui peut encore se produire par diffusion des corps mis en liberté se répartissant sur une étendue considérable.

La question est plus délicate quand on veut électriser un point localisé sous la peau sans altérer celle-ci en aucune sorte. L'élec-

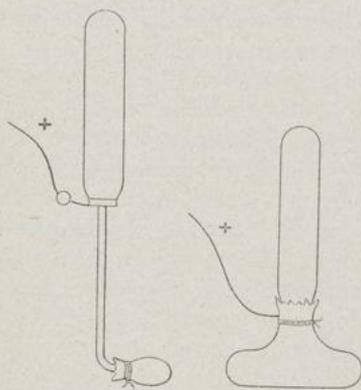


Fig. 518.

trode la plus en usage dans ce cas se compose d'un bloc de charbon de cornue recouvert de peau de chamois. On imbibé cette peau de chamois d'eau de fontaine. Le charbon n'étant pas au contact direct de la peau, il ne se produit pas d'électrolyse à la surface de cette peau, mais si la durée de passage se prolonge, il faut, pour évacuer les produits d'électrolyse, passer souvent l'électrode dans de l'eau fraîche; ce n'est qu'à cette con-

dition que l'on n'a pas d'accident sur la peau des enfants, par exemple, qui est très sensible.

On peut démontrer qu'en dehors des phénomènes d'électrolyse, qui ont lieu au contact des électrodes, il y a des décompositions chimiques dans l'intimité même des tissus. Ceci ne doit pas surprendre, puisqu'on a vu que de pareilles décompositions se pro-

duisent à toutes les surfaces de séparation, quand le courant traverse des corps hétérogènes. En particulier, dans les muscles dont le microscope nous montre la structure complexe, il n'est pas étonnant qu'à tout passage d'un élément d'une fibre à une autre il y ait électrolyse. On met cette électrolyse en évidence en montrant qu'après le passage du courant le muscle est le siège d'une polarisation. Si la durée de passage du courant a été assez longue et le courant assez intense, il peut en résulter une altération des tissus sur tout le trajet du courant, cette altération se traduit par des lésions visibles au microscope. Dans un grand nombre de cas cette électrolyse interstitielle joue un rôle considérable, quand on utilise le courant continu dans un but thérapeutique.

On a vu que, outre les phénomènes d'électrolyse, il y a entraînement des liquides traversés par le courant et des substances en dissolution dans ces liquides. Il en résulte qu'il peut se produire des échanges, aux points d'application des électrodes sur la peau, entre les liquides dont ces électrodes sont imprégnées et les liquides de l'organisme. On a cherché ainsi à extraire du corps humain certains principes toxiques dans les cas d'empoisonnement; il ne semble pas que ces tentatives aient été bien satisfaisantes. Les résultats ont été plus heureux et plus nets dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsqu'il s'agissait d'introduire une substance dans l'organisme. C'est ainsi qu'en plongeant le bras dans une solution de sel de lithium et faisant passer le courant de la solution vers le corps, on constate l'apparition du lithium dans l'urine. Il faut d'ailleurs orienter convenablement le sens du courant suivant le corps que l'on veut introduire; quand il joue le rôle de métal ou de base, il faut diriger le courant de la solution vers l'intérieur des tissus, et en sens contraire quand le corps joue le rôle d'acide. Ceci a été nettement mis en évidence par Leduc de la façon suivante. On prend deux lapins L, L' que l'on rase sur le flanc, on les met côte à côte en les séparant par une masse de coton trempé dans la solution du corps sur lequel on expérimente. Le courant est amené par deux électrodes indifférentes E, E'. Quand on imprègne le coton d'une solution de cyanure de potassium, c'est le lapin du côté du pôle positif qui s'empoisonne

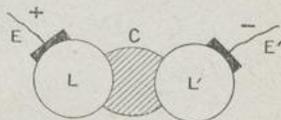


Fig. 519.

seul : c'est celui du côté négatif, si on prend du coton mouillé avec du chlorhydrate de strychnine. Cela tient à ce que, dans le premier cas, c'est l'acide qui est toxique; dans le second, c'est la base.

XVII

THERMO-ÉLECTRICITÉ

Quand on fait un circuit composé de deux fils métalliques de nature différente, par exemple un fil de cuivre et un fil de fer soudés bout à bout, un pareil circuit n'est le siège d'aucun courant aussi longtemps que les deux soudures A et B sont à la même température (fig. 520). Mais si l'on vient à chauffer l'une d'elles, A, aussitôt il se produit un courant, dit thermo-électrique, allant dans un des métaux de la soudure chaude à la soudure froide et en sens inverse dans l'autre.

Au lieu de mettre les deux métaux en contact direct à la soudure B par exemple, on peut intercaler en ce point un ou plusieurs autres métaux; on ne change rien au résultat final, à condition que l'ensemble des soudures ainsi obtenues, 1, 2, 3, soit à la même température que celle à laquelle se trouvait auparavant B (fig. 521).

De même on peut sans rien changer faire une section d'un

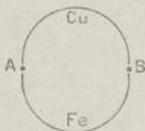


Fig. 520.

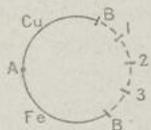


Fig. 521.

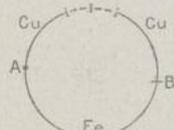


Fig. 522.

des fils, Cu, par exemple, et intercaler sur ce point un ou plusieurs métaux, pourvu que ces métaux aient la même température que celle à laquelle se trouvait le point de section (fig. 522).

Si au contraire on a une chaîne formée de métaux différents en nombre quelconque avec des températures différentes le long du circuit, on a une série de couples thermo-électriques dont les effets peuvent s'ajouter ou se retrancher.

Dans certaines limites, l'intensité de ce courant est proportionnelle à la différence de température entre les deux soudures; on a

donc là un moyen précieux, dans certains cas, pour mesurer les différences de température. Pour cela on intercale dans le circuit un galvanomètre, les deux soudures étant en A et en B (fig. 523). Pour une même différence de température le courant sera plus ou moins intense, suivant la nature des métaux employés; on exprime cela en disant que l'ensemble des deux métaux a un pouvoir thermo-électrique plus ou moins élevé. Une fois pour toutes, on gradue l'appareil en portant les deux soudures à une différence de température

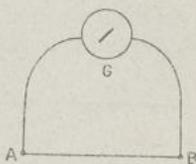


Fig. 523.

connue, 1 degré par exemple. Si dans ces conditions on constate une indication du galvanomètre de 100 divisions de l'échelle, chaque division correspondra à un centième de degré. Cette méthode peut devenir extrêmement sensible, grâce à la perfection des galvanomètres que l'on possède aujourd'hui. De plus on peut mettre plusieurs de ces piles thermo-électriques à la suite les unes des autres dans le même circuit en alternant les deux métaux, fer et cuivre, de même que l'on associe en série les éléments de pile ordinaires. On sait que dans ce cas, les forces électromotrices des divers éléments s'ajoutent. La résistance intérieure d'une pareille pile est d'ailleurs très faible et généralement négligeable par rapport au reste du circuit.

La figure 524 représente un schéma de cette disposition pour 4 éléments. Si l'on chauffe les quatre soudures impaires A_1, A_2, A_3, A_4 , en laissant B_1, B_2, B_3, B_4 à la température la plus basse on mesurera la différence de température entre le côté A et le côté B, mais bien entendu on aura plus de sensibilité qu'avec une seule paire de soudures. Il n'y a d'autre limite à la sensibilité que l'on peut atteindre que celle déterminée par l'espace dans lequel il faut loger les soudures. D'après ce qui a été dit plus haut, il importe que les points C et D, où la pile est reliée au galvanomètre, soient à la même température, sans cela le fil du galvanomètre formerait, avec les conducteurs arrivant aux bornes, un couple thermo-électrique qui fausserait les résultats.

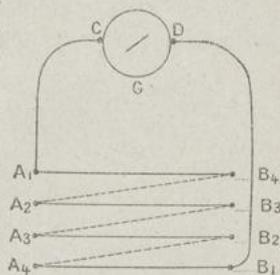


Fig. 524.

On se sert en particulier des soudures thermo-électriques dans les cas où un thermomètre serait trop volumineux pour être logé dans l'endroit à explorer. C'est le cas qui se présente souvent pour diverses parties du corps de l'homme et des animaux; voici les dispositifs les plus avantageux. On soude bout à bout un fil de



Fig. 525.

fer et un fil de nickel (fig. 525), ce sont les métaux qui donnent les meilleurs résultats, leur pouvoir thermo-électrique est assez élevé et ils sont faciles à travailler. Ces fils seront très fins, ils auront un dixième de millimètre de diamètre par exemple. L'un des fils sera enfilé dans une aiguille avec laquelle on traverse l'organe à explorer, pour tirer la soudure à l'intérieur de cet organe. Une fois la soudure en place, on enlève l'aiguille et on relie les extrémités libres du fer et du nickel aux bornes du galvanomètre, soit directement, soit par l'intermédiaire de fils de cuivre que l'on rajoute au bout du fer et du nickel.

Un autre dispositif très employé consiste à former avec les deux fils une aiguille que l'on pique dans les tissus (fig. 526). Il faut remarquer qu'en opérant comme il vient d'être indiqué, on mesure la différence de température entre la soudure fer-nickel plongée dans les tissus et la soudure extérieure dans laquelle est intercalé le fil du galvanomètre. On ne connaît généralement pas bien la température de cette soudure extérieure, et il vaut mieux associer deux aiguilles, comme l'indique la figure 527. L'une d'elles, A, est plongée dans les tissus à étudier; l'autre, B, dans une enceinte à température connue, de la glace fondante par

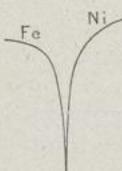


Fig. 526.

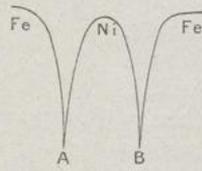


Fig. 527.

exemple. Les deux côtés fer sont reliés au galvanomètre et si tout le circuit est à une même température, sauf A et B, on mesure la différence de température entre A et B. Ce dispositif correspond au schéma de la figure 522, tandis que le précédent correspondait au schéma de la figure 521.

Dans le procédé de la figure 526 on mesure la différence de température entre l'aiguille et le milieu ambiant où se trouve le galvanomètre; s'il y a des changements dans ce milieu, il en résulte des erreurs. Dans le procédé de la figure 527 on mesure

la différence de température entre les tissus à explorer et la glace fondante; il suffit qu'il n'y ait pas de différences de température entre les divers points du reste du circuit où se trouvent des contacts de métaux différents, ce qui est assez aisé à obtenir.

XVIII

ÉLECTROTONUS

Le passage du courant électrique dans le nerf est accompagné de phénomènes très importants, consistant en modifications de l'excitabilité et production de courants.

Voici l'expérience fondamentale. Isolons un nerf MN sur une certaine longueur et appliquons sur lui deux électrodes AB servant à faire passer dans ce nerf un courant continu (fig. 528). Sous l'influence de ce courant continu, dit courant polarisant, le nerf n'est pas excité, comme on le verra plus loin; si donc on explore la région du nerf située en dehors des électrodes, on devrait trouver le courant de repos sans modification, après comme avant le passage du courant continu par AB. Or, on constate en appliquant des électrodes impolarisables soit en *ab*, soit en *a'b'*, l'existence d'un courant dirigé dans le circuit galvanométrique, comme l'indiquent les flèches de la figure. Dans la portion de nerf située soit entre *ab*, soit entre *a'b'*, le courant est de même sens que le courant passant par AB. Ceci suffirait à le distinguer du courant de repos fourni par le nerf qui ne peut être dirigé dans le même sens du côté M que du côté N. De plus ce courant d'électrotonus croît avec l'intensité du courant amené par AB, peut-être bien supérieur au courant de repos, et change de sens avec le courant polarisant.

Le phénomène a son maximum d'intensité au voisinage des électrodes A et B, à mesure qu'on s'en éloigne il baisse et ne se fait plus sentir à une certaine distance. C'est-à-dire que si l'on conserve une distance constante entre les électrodes *ab*, en se

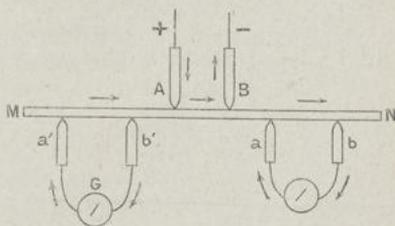


Fig. 528.

plaçant au voisinage de B, on a un maximum de courant électrotonique, et à mesure qu'on s'éloigne vers N ce courant diminue d'intensité. A 4 cm. environ de B on n'observe plus rien.

En dehors de ces manifestations électriques il y a un autre

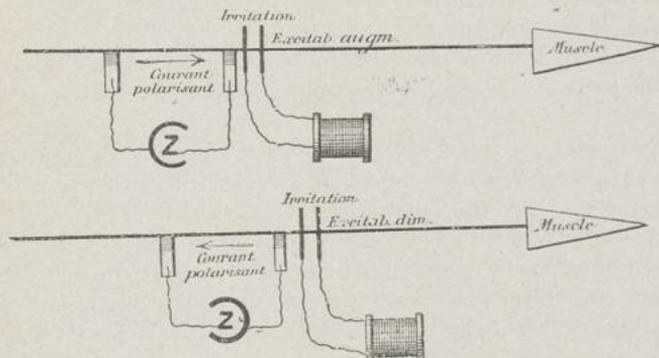


Fig. 529.

phénomène très important; l'excitabilité du nerf est modifiée dans les régions où se manifeste l'électrotonus. Elle est augmentée dans la région du katélectrotonus, c'est-à-dire aux environs de l'électrode négative, et diminuée dans la région de l'anélectrotonus c'est-à-dire aux environs de l'électrode positive, aussi bien en dehors des électrodes qu'entre ces électrodes.

Ainsi si en faisant passer le courant continu par AB, on explore l'excitabilité du nerf, on constate qu'au voisinage du point d'application de l'électrode B, aussi bien en dehors qu'en dedans de AB,

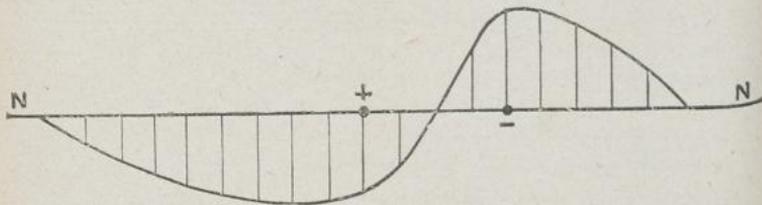


Fig. 530.

le nerf est plus excitable qu'avant le passage du courant. Aux environs de A c'est le contraire que l'on observe. Bien entendu, le phénomène est le plus marqué au point d'application même des électrodes et diminue à mesure qu'on s'en éloigne. La figure 529

montre comment il faut disposer l'expérience pour faire cette démonstration. La figure 530 montre schématiquement quels sont les changements d'excitabilité produits par le passage du courant dans les nerfs, les ordonnées portées au-dessus de la ligne correspondant à une augmentation, celles au-dessous de la ligne correspondant à une diminution.

Les anesthésiques diminuent beaucoup les phénomènes électrotoniques, ils sont aussi arrêtés par une ligature, c'est-à-dire que si l'on fait une ligature au voisinage de l'électrode qui amène le courant, les phénomènes électrotoniques ne font pas sentir leur effet au delà de cette ligature.

Quand on arrête l'expérience les phénomènes ne disparaissent pas instantanément, ils persistent un certain temps en diminuant d'intensité; en même temps il se produit quelques oscillations dans le sens des courants électrotoniques et dans l'excitabilité.

Le passage du courant continu dans le nerf modifie aussi la conductibilité de ce nerf. Si, par exemple, on place deux électrodes à la partie supérieure d'un nerf de grenouille et si l'on s'en sert pour provoquer une série de secousses avec une bobine d'induction, il suffit de faire passer dans le nerf un courant continu par des électrodes placées en *ab* (fig. 531) pour voir le muscle rester au repos, l'excitation partie de *AB* ne peut franchir *ab*. Si on arrête le courant passant en *ab*, la conductibilité du nerf est rétablie et le muscle recommence à se contracter à la suite de chaque excitation portée en *Ab*.

Ceci permet de faire une des expériences les plus intéressantes de la physiologie du nerf. Elle a pour but de démontrer que lorsqu'on fait une série d'excitations sur un nerf et que l'on voit la hauteur de la secousse musculaire aller en diminuant peu à peu, ce n'est pas par suite de la fatigue du nerf que cette diminution se produit. Le nerf est très résistant à la fatigue, nous l'avons déjà vu à propos de l'oscillation négative.

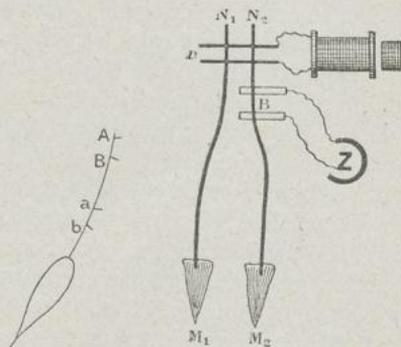


Fig. 531.

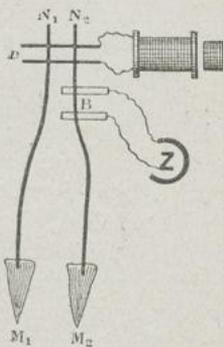


Fig. 532.

Voici comment on le démontre. On prépare deux muscles de grenouille avec leurs nerfs (fig. 532). A la partie supérieure des deux nerfs, N_1 , N_2 , on place des électrodes reliées à une bobine d'induction; on voit les deux muscles se contracter à chaque excitation. Faisons maintenant passer un courant continu en B; nous couperons la communication entre N_2 et le muscle, qui restera au repos. On continue les excitations et quand on constate que le muscle M_1 ne répond plus à ces excitations, on rompt le circuit de la pile; aussitôt le muscle M_2 recommence à se contracter, ce n'est donc pas le nerf qui est fatigué puisque N_1 et N_2 ont été soumis aux mêmes excitations.

L'explication la plus rationnelle des courants électrotoniques a

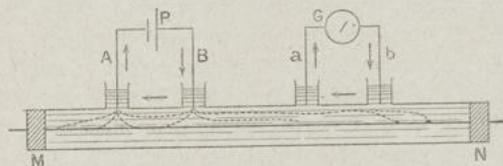


Fig. 533.

été donnée par L. Hermann; il les attribue à des phénomènes de polarisation se passant entre le cylindre-axe et la gaine de myéline. Il a d'ailleurs montré que l'on pouvait reproduire le phénomène sur un schéma. On prend un tube en verre MN portant quatre tubulures latérales A, B, a, b (fig. 533). Le tube contient un fil de platine tendu dans son axe entre deux bouchons, on le remplit d'une solution de sulfate de zinc et l'on plonge dans les tubulures de petits bâtons de zinc formant électrode impolarisable avec le liquide. Par AB on fait passer un courant, *ab* est relié à un galvanomètre qui dévie aussitôt que le courant passe par AB. On vérifie que les deux courants AB et *ab* sont de même sens. La déviation de G tient à ce que le courant ne va pas directement de A et B, au fil de platine; il se produit au moment du passage du courant de la solution jusqu'au platine, une polarisation de ce platine, le courant ne passe plus que difficilement, et diffuse vers les parties plus éloignées du fil de platine, comme l'indique la figure.

Il est si vrai que c'est là l'explication, que si l'on remplace le fil de platine par un fil de zinc, le galvanomètre ne décele plus aucun courant; on sait que le zinc dans une solution de son sel ne se polarise pas.

XIX

EXCITATION ÉLECTRIQUE DES NERFS
ET DES MUSCLES

On peut provoquer la contraction musculaire soit en agissant directement sur le muscle, soit en opérant par l'intermédiaire du nerf.

Dans le premier cas on place les électrodes directement sur le muscle. On peut même, si l'on veut être certain de n'agir que sur le muscle lui-même, empoisonner préalablement, au moyen du curare, l'animal sur lequel on opère.

Les tubes nerveux composant un nerf moteur allant à un muscle se terminent par des plaques motrices appliquées sur les diverses fibres musculaires. Le curare a pour effet de paralyser ces plaques terminales motrices. Chez un animal ayant reçu ce poison tout se passe donc comme si le muscle était complètement isolé du système nerveux. Si, sur cet animal, que nous supposons être une grenouille, on vient à détacher un muscle et qu'on le fixe à un myographe, il suffira de le faire traverser par une décharge électrique au moyen d'électrodes placées à ses deux extrémités (fig. 534) pour voir aussitôt le muscle se contracter et inscrire une secousse sur un papier enfumé. En réalité la secousse du muscle ne commence pas aussitôt que l'excitation électrique a traversé ce muscle, il y a toujours un certain intervalle de temps entre le moment de l'excitation et le commencement de la réponse. Cet intervalle se nomme période latente ou temps perdu; il a été mis en évidence pour la première fois par Helmholtz.

Voici comment se fait la mesure de la période latente dans le cas de l'excitation du muscle. On relie le muscle M au myographe dont la pointe A inscrira sur le cylindre enregistreur toutes les contractions du muscle (fig. 533). Les extrémités de ce muscle sont reliées au circuit secondaire d'une bobine d'induction D de façon que la décharge de cette bobine, au moment de sa production, traverse ce muscle. Dans le circuit primaire de la bobine se trouve une pile P et un signal de Marcel Deprez B qui indiquera

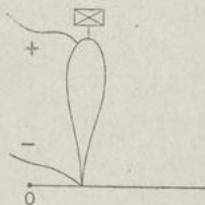


Fig. 534.

toutes les fermetures ou ruptures du courant primaire. En C se trouve un interrupteur. La pointe B du signal de Deprez inscrit

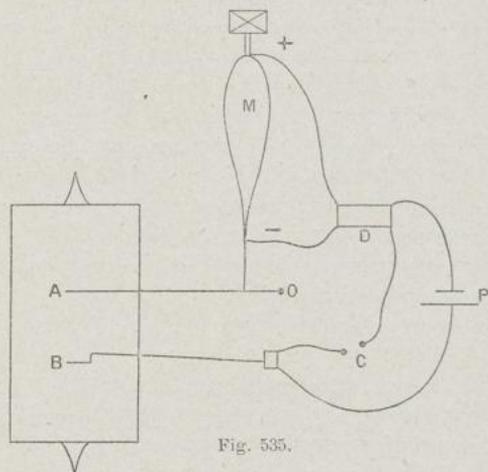


Fig. 535.

ses déplacements sur le même cylindre enregistreur que A, les deux pointes se trouvant sur la même génératrice.

Si l'on vient à fermer le circuit en C le signal B fonctionne et indique cette fermeture sur le tracé. En même temps il se produit une onde induite dans la bobine D et le muscle M est excité. Il va se contracter; on a alors un tracé analogue à celui de la figure 536. Sur la ligne B se trouve un cran *b* indiquant le fonctionnement du signal. Sur A on voit en *a* le commencement de la secousse. Si ce commencement de secousse coïncide avec le moment de l'excitation, *a* et *b* doivent se trouver sur la même génératrice du cylindre. Mais en réalité le muscle n'a commencé à se contracter qu'un certain temps après l'excitation, le cylindre a tourné d'une certaine quantité dans cet intervalle; *b* et *a* se trou-

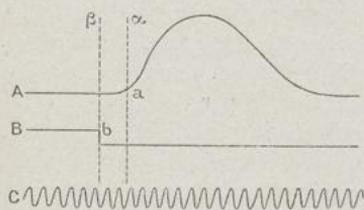


Fig. 536.

vent sur des génératrices différentes β et α dont l'écartement représente précisément la quantité dont *a* tourné le cylindre pendant la période latente.

En même temps que l'on a fait cette opération, on trace sur le cylindre, à l'aide d'un diapason par exemple, une courbe sinuëuse C dont les ondulations représentent des fractions de seconde, il suffit de compter combien il y a de ces ondulations entre les génératrices α et β pour avoir en fractions de seconde la durée de la période latente.

On trouve ainsi que cette période latente est chez la grenouille d'environ 0",005 à la température ordinaire. Elle diminue quand la température s'élève et augmente quand elle baisse.

Supposons qu'au lieu d'exciter directement le muscle on applique les deux électrodes en une région A du nerf (fig. 537), on trouvera

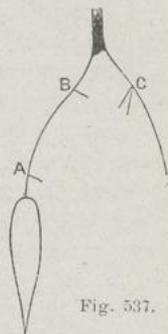


Fig. 537.

une période latente plus longue que dans l'excitation directe. Il faut en effet exciter le nerf, puis cette excitation doit parcourir une certaine longueur du nerf pour arriver jusqu'au muscle; il faut faire entrer les plaques terminales en jeu et finalement le muscle se contracte. Si on fait une nouvelle expérience en portant l'excitation en une région B plus élevée, la période latente sera encore plus grande.

Il est évident que la différence entre les périodes latentes A et B représentera le temps qu'il faut à l'excitation pour aller de B en A. Si l'on mesure au compas la longueur AB, on pourra déduire de ces données la vitesse de propagation de l'influx nerveux par seconde. Ainsi supposons que AB ait 2 cm. = 0 m. 02 et que la période latente en B ait 0",0007 de plus qu'en A, nous dirons : En 0",0007 l'influx nerveux a parcouru 0 m. 02; en 1" il aura parcouru $\frac{0 \text{ m. } 02}{0,0007} = 28 \text{ m.}$ C'est le chiffre que l'on considère comme étant la vitesse de l'influx nerveux chez la grenouille. Chez l'homme et les mammifères, elle est plus grande, le double environ.

On peut enfin porter l'excitation en C avant la moelle et faire une secousse réflexe, en prenant la différence entre cette période latente et celle qui a été mesurée en B, on a la période latente de la moelle. Elle est relativement considérable. On trouve en effet en C environ le double de ce que l'on avait trouvé en B.

Revenons à l'excitation directe du muscle. Cette excitation se fait aussi bien par les courants descendants que par les courants

ascendants, c'est-à-dire que l'on a sensiblement le même résultat en appliquant l'électrode + ou l'électrode - à la partie supérieure du muscle.

Il y a une différence importante entre les effets excitateurs de l'électricité suivant que l'on a affaire à un courant continu ou à une décharge brusque.

Si ayant appliqué deux électrodes sur un muscle on fait passer par ces électrodes un courant d'abord très faible, puis croissant lentement, on constate que le muscle ne se raccourcit que pour d'assez fortes intensités, et encore ce raccourcissement n'est-il jamais qu'une fraction assez réduite de celui qui peut se produire dans la secousse. Au contraire, si l'on fait varier brusquement l'intensité du courant, si par exemple on envoie à travers le muscle une décharge de condensateur ou une onde induite, il se produit une secousse très forte pour des intensités même très faibles. La période variable du début de la fermeture ou de la rupture d'un courant continu agit de la même façon, on obtient des secousses dites de fermeture ou de rupture du courant continu.

Ces phénomènes sont encore beaucoup plus nets quand l'excitation se fait par l'intermédiaire du nerf moteur. Dans ce cas on n'obtient pas le moindre raccourcissement du muscle innervé en faisant agir le courant continu. Il suffit au contraire de produire une variation brusque de ce courant en le faisant croître ou décroître, ou encore d'employer une onde de fermeture, de rupture, une décharge induite ou de condensateur pour avoir une secousse très énergique du muscle.

C'est en présence de ces faits que Du Bois-Reymond avait formulé la loi qui porte son nom et d'après laquelle l'excitation serait liée non pas à l'intensité des courants, mais aux variations de cette intensité.

De nombreux expérimentateurs ont recherché quels pouvaient être les facteurs qui intervenaient dans l'excitation électrique des nerfs et des muscles. Comme il vient d'être dit, pour Du Bois-Reymond l'excitation était directement liée à la variation d'intensité du courant; elle était d'autant plus efficace que cette variation était plus rapide. Ce fut là, pendant longtemps l'opinion classique. Puis l'on chercha à relier la grandeur de l'excitation à l'énergie de la décharge. Il est aujourd'hui généralement admis que l'excitation par décharges brèves dépend de deux facteurs, la durée de cette décharge et la quantité d'électricité mise en jeu.

Si la durée de la décharge reste constante, une même excitation sera obtenue par une même quantité d'électricité mise en jeu, quelle que soit la forme de la décharge.

Si la durée de la décharge varie, pour obtenir une même excitation, il faudra une quantité d'électricité déterminée par la formule $Q = a + bt$, a et b dépendant dans chaque cas des conditions de l'expérience, nature de l'animal, emplacement des électrodes, etc.

Pour l'excitation du nerf, la direction dans laquelle le nerf est parcouru par l'onde excitatrice est plus importante que pour le muscle, une excitation descendante est plus active qu'une excitation ascendante. C'est-à-dire que si l'on place deux électrodes sur un nerf, en faisant croître progressivement l'intensité des décharges et alternant leur sens, l'électrode supérieure étant tantôt positive, tantôt négative, on constate qu'il se produit une réponse du muscle



Fig. 538.

pour le premier cas alors que dans le second cas l'excitation est encore inefficace; il faut forcer l'intensité de la décharge pour avoir une réponse avec l'onde ascendante.

Supposons maintenant que l'on agisse soit directement sur le muscle, soit sur le nerf moteur, à l'aide d'une onde descendante ou ascendante, et que l'on prenne d'abord des décharges extrêmement faibles. Au début on n'aura aucune réponse, mais en faisant croître peu à peu l'intensité des décharges, il arrive un moment où la première trace de secousse apparaît. Si le muscle est relié à un myographe, à ce moment, c'est à peine si le levier myographique fait un crochet visible sur le papier enfumé. On dit alors que l'on est au *seuil de l'excitation*. Si on augmente très doucement l'intensité des décharges, la hauteur de la secousse croît, et très rapidement atteint une limite que l'on ne peut dépasser; on est arrivé à la *secousse maximale*. C'est ce que représente la figure 538, le tracé 1 correspondant à une excitation au-dessous du seuil qui se trouve en 2. A partir de 5 on a la secousse maximale. Ici il y a une remarque très importante à faire. Pour certains muscles on ne connaît que la secousse maximale, c'est-à-dire qu'une excitation est ou trop faible pour provoquer la moindre réponse, ou bien, la réponse se faisant, le muscle donne

ladite secousse maximale. Le cœur est dans ce cas. Si l'on sépare sur une grenouille la pointe du cœur, c'est-à-dire le ventricule isolé de l'oreillette, il cesse de battre spontanément. On peut alors provoquer ses secousses comme on le fait sur un muscle quelconque, le gastrocnémien par exemple, et l'on constate que toute excitation efficace donne la secousse maximale ; tout ou rien.

Sur le gastrocnémien de la grenouille il n'en est pas de même, on peut avoir une série de secousses intermédiaires entre le seuil de l'excitation et la secousse maximale, comme le représente la figure 538, mais il faut faire croître très lentement



Fig. 539.

l'excitation ; très rapidement on passe du minimum au maximum.

Il y a lieu de remarquer que la secousse maximale ne correspond pas au maximum de raccourcissement que puisse prendre le muscle. En effet considérons une secousse maximale ; avec une vitesse de rotation du cylindre très lente, elle sera représentée par une simple ordonnée (fig. 539). Au bout de deux ou trois secondes répétons la même excitation, nous aurons une deuxième secousse, elle sera un peu plus haute que la précédente, si nous recommençons nous aurons une série de secousses de plus en plus hautes, donnant lieu à ce que l'on appelle le *phénomène de l'escalier*.

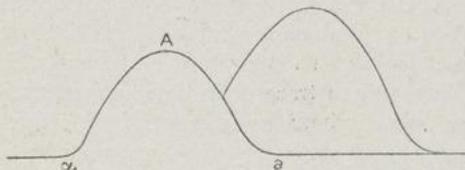


Fig. 540.

Après quelque temps la hauteur de la secousse reste constante puis va en diminuant par suite de la fatigue. La première secousse, quoique maximale, c'est-à-dire la plus haute qu'il ait été possible d'obtenir comme première secousse, ne correspondait donc pas au maximum de raccourcissement dont est susceptible le muscle, puisqu'il en donne de plus hautes dans la suite.

Voici encore un autre phénomène qui fait ressortir le même fait. Traçons encore une secousse musculaire (fig. 540) avec une

vitesse de rotation du cylindre plus grande que dans les cas précédents, nous aurons le tracé αAa . Faisons suivre cette première secousse d'une autre excitation identique à la première. Si les deux excitations sont séparées par un intervalle suffisant, les deux secousses seront distinctes, mais si l'on rapproche peu à peu la deuxième excitation de la première, il arrivera un moment où la deuxième secousse commencera alors que la première n'est pas terminée; son début se trouvera sur la couche de descente de la précédente. On constate alors que le levier s'élève d'autant plus haut que le point de départ de la deuxième secousse est plus élevé. Le muscle pouvait donc se raccourcir plus qu'il ne l'a fait dans le premier cas.

Enfin si l'on fait une série d'excitations périodiques en les rapprochant de plus en plus; on constate que les secousses se fusionnent progressivement les unes avec

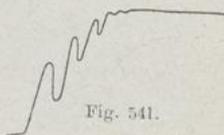


Fig. 541.

les autres, on a un raccourcissement permanent nommé *tétanos physiologique*, dans lequel la hauteur à laquelle s'élève le levier myographique est beaucoup plus grande que pour la secousse maximale (fig. 541).

Donc, la hauteur de la secousse maximale que l'on ne peut pas dépasser par une excitation unique, quelque forte qu'elle soit, est limitée non par les conditions mécaniques du muscle, mais par l'insuffisance de l'excitation. La *secousse maximale* est la secousse la plus haute que l'on puisse obtenir avec une excitation unique.

Il y a une différence capitale entre une excitation unique et une excitation périodique, l'excitation périodique ne produit pas seulement la répétition des effets de l'excitation unique, il y a des résultats impossibles à obtenir avec l'excitation isolée et qui s'obtiennent avec la plus grande facilité par l'excitation périodique. En voici un exemple important. Quand on veut provoquer une contraction réflexe chez la grenouille, on relie au myographe le muscle gastrocnémien gauche par exemple, puis on découvre le sciatique droit et on le coupe du côté périphérique. Pour avoir un réflexe on excitera le bout central de ce sciatique coupé. Or, si on cherche à faire cette excitation avec une décharge électrique unique, onde induite de bobine ou décharge de condensateur, on n'a aucune réponse, même avec la décharge électrique la plus forte. Au contraire, il suffit de prendre une excitation périodique, même d'intensité minime, pour avoir aussitôt une contraction éner-

gique du gastrocnémien gauche. La moelle n'entre pas en activité sous l'influence d'une excitation unique, mais elle le fait très facilement par une excitation périodique. On voit l'abîme qu'il y

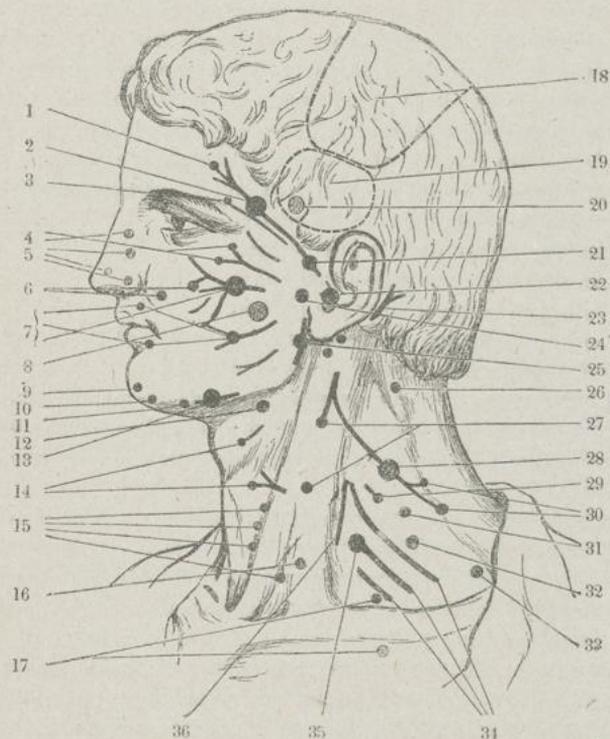


Fig. 542.

1. Muscle frontal. — 2. N. facial (branche supérieure). — 3. M. sourcilier. — 4. Orbiculaire palpébral. — 5. M. du nez. — 6. Zygomatique. — 7. Orbiculaire des lèvres. — 8. Masséter. — 9. Houppes du menton. — 10. Carré du menton. — 11. Triangulaire. — 12. N. hypoglosse. — 13. Branche inférieure du facial. — 14. M. sus-hyoïdien. — 15. M. hyoïdien. — 16. M. omohyoïdien. — 17. M. pectoral. — 18. Circov. — 19. Insula. — 20. M. temporal. — 21. N. facial. — 22. Id. — 23. Nerf auriculaire postérieur. — 24. Br. faciale moyenne. — 25. Br. faciale inférieure. — 26. M. splénus. — 27. Sternocléidomastoïdien. — 28. N. accessoire. — 29. M. angulaire. — 30. M. trapèze. — 31. N. dorsal de l'épaule. — 32. N. axillaire. — 33. N. thoracique. — 34. Plexus brachial. — 35. M. deltoïde, Biceps long supinateur (Point d'Erb). — 36. N. phrénique.

a entre les résultats de cette excitation périodique et ce que l'on pourrait imaginer comme la répétition des résultats d'une excitation unique.

Au lieu d'appliquer sur un nerf ou sur un muscle les deux

électrodes, de façon à faire passer la décharge dans une certaine étendue de longueur de cet organe, on peut ne placer sur lui

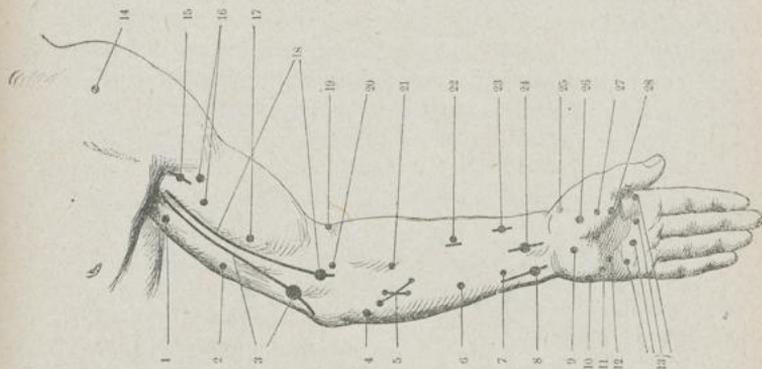


Fig. 543.

M. triceps. — 2. M. triceps (portion interne). — 3. N. cubital. — 4. M. cubital. — 5. Fléchisseurs. — 6. Fléchisseurs superficiels (médus et annulaire). — 7. Fléchisseurs superficiels (index et auriculaire). — 8. N. cubital. — 9. M. palmaire interne. — 10. M. abducteur du petit doigt. — 11. Court fléchisseur. — 12. Opposant. — 13. Lombricaux. — 14. Delloïde. — 15. Nerf musculocutané. — 16. Biceps. — 17. Brachial interne. — 18. N. médian. — 19. Long supinateur. — 20. Rond pronateur. — 21. Fléchisseurs. — 22. Fléchisseur superficiel. — 23. Long fléchisseur du pouce. — 24. N. médian. — 25. Court abducteur. — 26. Opposant. — 27. Court fléchisseur. — 28. Adducteur.

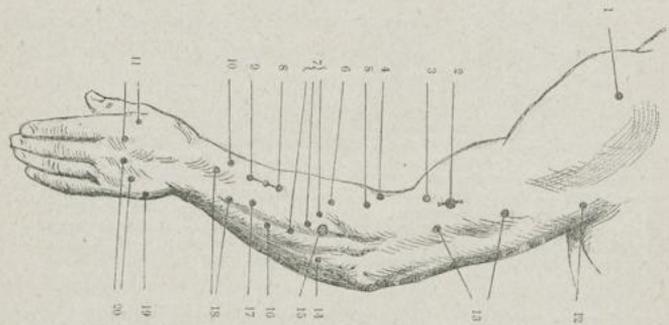


Fig. 544.

1. Delloïde. — 2. N. radial. — 3. M. brachial. — 4. Long. sup. — 5. N. radial. — 6. N. radial. — 7. Extenseur commun des doigts. — 8. Extenseur propre de l'index. — 9. Long abducteur du pouce. — 10. Court extenseur du pouce. — 11. Intersosseux. — 12. Triceps. — 13. Triceps (branche externe). — 14. M. cubital. — 15. Court supinateur. — 16. Extenseur du petit doigt. — 17. Extenseur de l'index. — 18. Long extenseur du pouce. — 19. Abducteur du petit doigt. — 20. M. intersosseux dorsaux.

qu'une seule électrode, une grande électrode indifférente achevant de fermer le circuit. Par exemple on placera une grenouille sur

une grande surface métallique recouverte de coton mouillé, ce sera l'électrode indifférente; le courant entrera par une grande surface dans l'animal, il ne produira nulle part d'excitation, son action étant trop disséminée, puis on touchera le point à exciter avec une électrode très fine, ce sera l'électrode active. On pratique ainsi ce que M. Chauveau a appelé l'*excitation unipolaire*.

La décharge électrique passe alors par le point à exciter, mais on

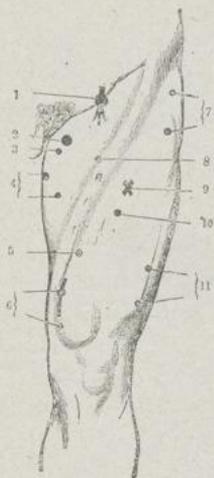


Fig. 545.

1. N. crural. — 2. N. obturateur. — 3. M. pectiné. — 4. Grand abducteur. — 5. Droit antérieur. — 6. Vaste interne. — 7. Tenseur du fascia lata. — 8. Contourier. — 9. Point commun pour les muscles antérieurs de la cuisse. — 10. Droit antérieur. — 11. Vaste interne.

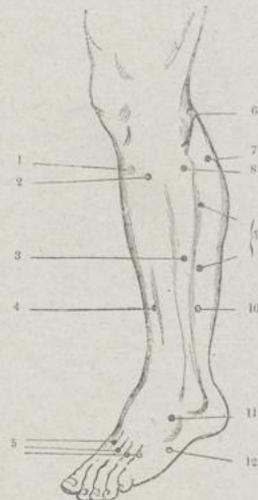


Fig. 546.

1. Tibia antérieur. — 2. Extenseur commun des orteils. — 3. Court péronier. — 4. Long extenseur du pouce. — 5. Interosseux. — 6. N. péronier. — 7. Jumeau extérieur. — 8. Long péronier. — 9. Soléaire. — 10. Long fléchisseur du pouce. — 11. Court extenseur commun des orteils. — 12. Abducteur du petit orteil.

ne peut plus parler de décharge ascendante ou descendante puisque l'électricité se propage en tous sens à partir du point touché. On précise alors les conditions en donnant le nom de l'électrode active, on excite avec l'anode ou avec la cathode. On peut opérer ainsi sur le nerf et le muscle mis à nu, ou sur ces organes recouverts par la peau. C'est de cette dernière façon que l'on opère généralement sur l'homme, on explore les nerfs et les muscles à travers la peau, au moyen de l'excitation unipolaire. Pour simplifier les

écritures on a imaginé des signes conventionnels indiquant l'opération que l'on exécute.

L'exploration électrique des nerfs et des muscles sur l'homme se fait souvent au moyen de l'onde de fermeture ou d'ouverture du courant, il faut alors indiquer le nom de l'électrode, l'intensité du courant employé et le résultat obtenu. Le nom de l'électrode s'indiquera par A (anode) ou K (kathode); le résultat par S (secousse) ou Z (Zuckung); la fermeture ou l'ouverture par F ou O. Enfin l'intensité du courant sera donnée en milliampères.

Ainsi KFS 7 milliampères, signifiera que l'on a obtenu une secousse avec 7 milliampères, à la fermeture, la kathode étant l'électrode active.

Il y a sur le corps un certain nombre de points d'élection correspondant aux divers nerfs et aux muscles, c'est-à-dire que c'est en ces points qu'il faut appliquer l'électrode active pour exciter un nerf ou un muscle déterminé avec la moindre intensité. Si cette localisation est bien faite, et que l'on fasse croître peu à peu l'intensité du courant, la première secousse qui apparaît est limitée à un muscle ou aux muscles innervés par un nerf, suivant que le point moteur correspond à un muscle ou à un nerf. Les figures 542, 543, 544, 545, 546 et 547, donnent la localisation de ces divers points moteurs suivant Erb.

Quand on applique l'électrode active sur un de ces points moteurs, on constate l'apparition de la secousse d'abord pour la fermeture de la kathode, puis celle de l'anode, puis pour l'ouverture de l'anode et enfin pour l'ouverture de la kathode, ce qui se désigne par la suite

KFS — AFS — AOS — KOS

quand le courant augmente peu à peu.

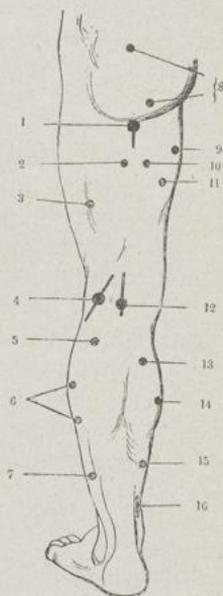


Fig. 547.

1. N. ischiatique. — 2. Biceps (longue portion). — 3. Biceps (courte portion). — 4. N. péronier. — 5. Jumeau extenseur. — 6. Soléaire. — 7. Long fléchisseur du pouce. — 8. Grand fémur. — 9. Adducteur. — 10. Demi-tendineux. — 11. Demi-membraneux. — 12. N. tibial. — 13. Soléaire (branche interne). — 14. Soléaire. — 15. Fléchisseur commun. — 16. N. tibial.

Ces résultats s'obtiennent à l'état normal seulement. Dans diverses affections l'ordre des secousses est modifié, et l'on a alors ce que l'on appelle *une inversion de la formule des secousses*.

Cette notation, bien entendu, ne s'applique pas aux explorations faites avec le courant induit, on donne alors en langage ordinaire les résultats obtenus.

À l'état normal, quand on applique une électrode active sur un point moteur, on a avec la plus grande facilité une réponse pour des ondes induites uniques et un tétanos pour un courant périodique de bobine d'induction. Il arrive qu'à l'état pathologique il n'en soit plus ainsi et que l'on ne puisse plus provoquer la contraction musculaire au moyen de la bobine, alors que l'on a encore des réponses par la fermeture d'un courant continu.

L'exploration électrique consiste précisément à rechercher en quoi les nerfs ou les muscles ne répondent plus comme à l'état normal; dans certains cas les modifications ainsi obtenues peuvent servir à éclairer un diagnostic.

XX

COURANTS DE HAUTE FRÉQUENCE

Quand on produit des courants alternatifs soit au moyen de machines dynamo-électriques, soit au moyen de bobines d'induction, on n'obtient jamais qu'un nombre assez limité d'alternances par seconde, pour arriver à la centaine il faut déjà des interrupteurs particuliers, et à mesure que l'on veut aller plus loin, les difficultés croissent rapidement.

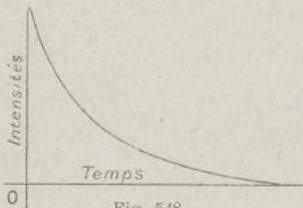


Fig. 548.

Depuis quelques années, grâce à des procédés complètement indépendants des interrupteurs mécaniques, on est arrivé à un nombre d'alternances plus de cent ou mille fois plus considérable.

Quand on prend un condensateur chargé, une bouteille de Leyde, par exemple, et que l'on met les deux armatures en communication, il se produit une décharge, ces deux armatures revenant au même potentiel. Pendant cette décharge, l'intensité du

courant, très grande au début, tombe peu à peu à zéro. On peut représenter cette variation de courant par une courbe de la forme représentée sur la figure 548. En somme l'électricité s'écoule à travers le conducteur réunissant les deux armatures comme s'écoulerait l'eau dans un tuyau placé entre deux réservoirs contenant de l'eau à différentes hauteurs (fig. 549). Au commencement le

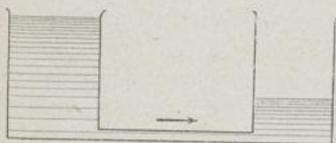


Fig. 549.

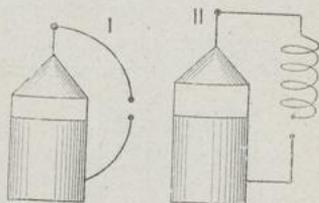


Fig. 550.

courant est très rapide, puis il baisse peu à peu de vitesse à mesure que l'égalité du niveau s'établit.

La décharge électrique conserve la forme de la figure 548 tant que le conducteur qui réunit les deux armatures ne comporte aucun enroulement en hélice, c'est-à-dire qu'il va d'une armature à l'autre par un chemin analogue à celui qui est représenté sur la figure 550, I. Il n'en est plus de même si sur le parcours du circuit de décharge se trouve un solénoïde, c'est le cas représenté sur la figure 550, II. On dit alors que le circuit possède une certaine self-induction. C'est-à-dire que les divers tours de spire agissent par induction sur les tours voisins, comme dans la bobine

de Ruhmkorff l'inducteur agit sur les tours de l'induit. Cette self-induction modifie complètement la décharge qui devient oscillatoire et peut être représentée par la courbe de la figure 551, c'est-à-dire que le courant, au lieu de tomber d'une valeur initiale assez grande à zéro par diminution graduelle, subit un certain nombre d'alter-

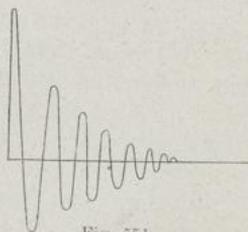


Fig. 551.

nances. C'est ce qui pourrait aussi arriver pour l'eau dans la comparaison hydraulique que nous avons faite. Il pourrait arriver, si la résistance dans le passage du tube de communication n'était pas trop grande, que les deux niveaux ne se mènent pas graduellement à la même hauteur, mais n'atteignent cet équilibre qu'à la

suite d'une série d'oscillations que l'on peut rapprocher de celles d'un pendule.

Le nombre d'oscillations électriques se produisant dans ces conditions varie de fréquence, ou, si l'on veut, les oscillations sont plus ou moins courtes, suivant la capacité de la bouteille, la résistance du circuit de décharge et sa self-induction. C'est-à-dire, suivant que l'on prendra un condensateur de plus ou moins grande capacité, un fil plus ou moins gros et long et un nombre de tours de spire plus ou moins grand, on aura des oscillations plus ou

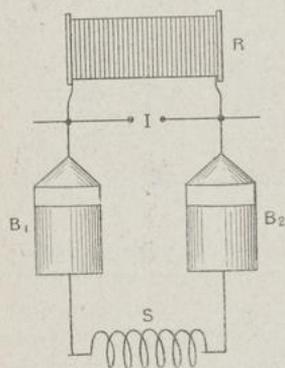


Fig. 552.

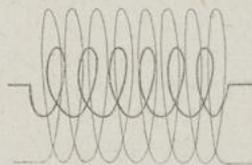


Fig. 553.

s'arrêtent, il faut pour que le phénomène ait une certaine continuité, recharger la bouteille chaque fois qu'elle est déchargée.

Tesla, qui le premier a bien étudié ces courants oscillatoires de haute fréquence, avait imaginé pour les produire un dispositif moins pratique que celui qui est généralement employé maintenant, et qui est dû à d'Arsonval. On relie les deux pôles d'une bobine de Ruhmkorff aux armatures internes de deux bouteilles de Leyde. Quand la bobine fonctionne les deux armatures internes se chargent alternativement, positivement et négativement. Aussitôt que la charge dépasse une certaine limite, la décharge se fait en I (fig. 552). Pendant ces charges et ces décharges, les armatures extérieures se chargent et se déchargent aussi en sens contraire, par influence à travers le solénoïde S et il en résulte dans ce solénoïde une série d'oscillations électriques à haute fréquence.

On peut, pour utiliser ces oscillations, relier directement deux conducteurs à deux spires différentes du solénoïde qui est à

spir
bien
coup
cela
On
cuit
avoit
part
S
Oud
solé
asse
uns
infé
à l'
Ley
va
bob
spir
relié
bout
l'inc
Q
fonc
gear
se p
il su
ce s
latio
A
vena
arriv
che;
et o
les t
Pe
très
pouv
guel
De

spirales assez peu nombreuses, une vingtaine, et à très gros fil. Ou bien (fig. 553) on peut entourer le solénoïde d'un autre fil beaucoup plus fin sur lequel le premier agira par induction, comme cela se produit entre les deux circuits de la bobine de Ruhmkorff. On recueille alors le courant à haute fréquence de ce second circuit. L'ensemble des deux bobines est plongé dans le pétrole pour avoir un bon isolement et éviter les étincelles entre les diverses parties de l'appareil.

Souvent on emploie un autre dispositif nommé résonnateur de Oudin, qui se compose d'un simple solénoïde S, de fil gros, à tours assez nombreux, mais isolés les uns des autres par l'air. La partie inférieure du solénoïde est reliée à l'armature d'une bouteille de Leyde B₂ dont l'autre armature va comme précédemment à la bobine d'induction. A quelques spires au-dessus, le solénoïde est relié à l'armature d'une autre bouteille de Leyde B₁, comme l'indique la figure 554.

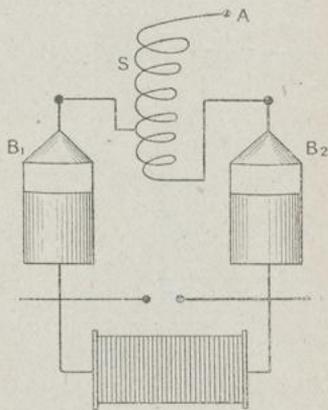


Fig. 554.

Quand la bobine de Ruhmkorff fonctionne, chargeant et déchargeant les bouteilles de Leyde, il se produit dans le solénoïde une série d'oscillations électriques, et il suffit de relier le corps à électriser à l'extrémité supérieure de ce solénoïde en A, pour que ce corps soit parcouru par des oscillations à haute fréquence dont le solénoïde est le siège.

Afin que cet instrument fonctionne bien il faut choisir convenablement la spire à laquelle est reliée la bouteille B₁. Pour arriver à un bon réglage on met la bobine de Ruhmkorff en marche; puis, à l'aide d'un manche isolant, on tient le fil relié à B₁, et on cherche par tâtonnement la spire la plus convenable, en les touchant successivement.

Pour réaliser ces expériences, il faut des bobines de Ruhmkorff très puissantes, munies d'interrupteurs spéciaux. Elles doivent pouvoir donner des étincelles d'au moins 25 centimètres de longueur.

Depuis ces dernières années le modèle en usage dans les labora-

toires, dû à Foucault et à Ruhmkorff, est remplacé de préférence par ce que l'on nomme des transformateurs, dont le principe est absolument le même que celui des bobines d'induction, mais dont la forme et la disposition des fils varient suivant les constructeurs.

Un des modèles répandus, connu sous le nom de transformateur Rochefort (fig. 555), se compose d'une longue bobine primaire *f* à gros fil; c'est par elle que passe le courant inducteur sur lequel

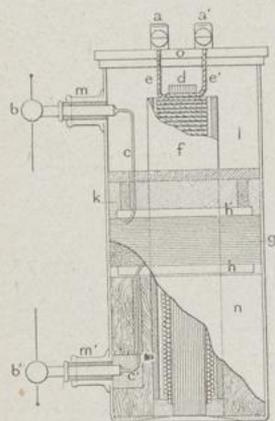


Fig. 555.

est intercalé l'interrupteur. La bobine induite à fil plus fin, *g*, est très courte. Le tout est plongé dans une substance isolante de consistance pâteuse. Cet appareil donne de très bons résultats.

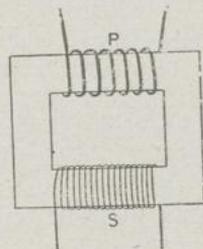


Fig. 556.

Dans le transformateur Labour, le fil primaire *P* est enroulé, comme l'indique la figure 556, sur un des côtés d'un rectangle en fer doux; c'est dans le circuit de ce fil que se trouve le générateur de courant et l'interrupteur. Le fil secondaire *S*, plus fin, dans lequel se produit le courant induit, est enroulé sur le côté opposé

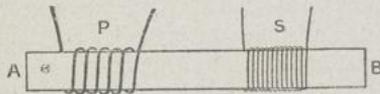


Fig. 557.

du cadre en fer. A mesure que le courant primaire revient à son état primitif, il se produit dans le fil secondaire *S* un courant induit alternatif, comme cela a lieu dans la bobine d'induction habituelle. Au premier abord il semble y avoir une grande différence entre cet appareil et la bobine d'induction, mais en regardant les choses de plus près il n'en est rien. Considérons d'abord la bobine de Ruhmkorff et faisons une première modification: au lieu de placer les bobines l'une dans

l'au
l'inc
mag
dan
tran
Lab

Il
dan
bien
mon
mai
de c
résu
moi
tien

T
cial
une
gen
P e
de v
en c
le ci
le fi
le p
avec
gène
proc
aller

G
cet i

L
autr
oscil
les c
men
est o
c'est
la re
de h

l'autre, mettons-les l'une à côté de l'autre sur un fer doux comme l'indique la figure 557. Le courant primaire P fera varier le magnétisme du fer doux et il se produira des courants induits dans S. Replions maintenant le fer doux de façon à amener la tranche B contre la tranche A, nous aurons le transformateur Labour.

Il n'y a aucun intérêt à décrire les nombreux interrupteurs dans lesquels une pointe vient prendre contact sur du mercure ou bien où le circuit se ferme et se rompt périodiquement entre deux morceaux de métal. Cela a une très grande importance pratique, mais le mieux est d'examiner les appareils de ce genre dans le laboratoire, leur qualité résultant le plus souvent de leur plus ou moins bonne construction et de leur entretien.

Toutefois il faut faire une mention spéciale pour l'interrupteur Wehnelt. Dans une cuve contenant de l'eau acidulée plongent une lame de plomb à grande surface P et un fil de platine isolé dans un tube de verre, de façon que sa pointe seule soit en contact avec le liquide. On intercale ce simple appareil dans le circuit d'un générateur du courant continu en même temps que le fil primaire d'une bobine d'induction ou d'un transformateur, le plomb étant en communication avec le pôle — et le platine avec le pôle +. Aussitôt il se dégage sur le fil de platine de l'oxygène qui interrompt le circuit. Si le courant est assez intense il se produit en ce point une série de ruptures du courant pouvant aller jusqu'à 4 500 interruptions par seconde.

Grâce à ce grand nombre d'interruptions et à leur perfection, cet instrument donne d'excellents résultats.

Les oscillations électriques à haute fréquence se distinguent des autres courants par des propriétés remarquables. D'abord ces oscillations se transmettent beaucoup plus facilement à travers les corps peu conducteurs, comme le bois ou une ficelle. Généralement, quand on veut faire briller une lampe à incandescence, on est obligé de lui relier les deux pôles d'un générateur d'électricité, c'est-à-dire de l'intercaler dans un circuit. Il suffit au contraire de la relier par un seul fil à un solénoïde parcouru par des courants de haute fréquence pour qu'elle s'allume. Il y a mieux, en appro-

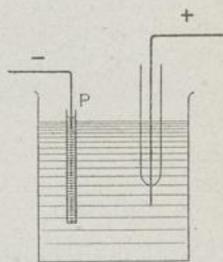


Fig. 558.

chant un tube vide d'air de ce solénoïde, sans établir de contact, on voit le tube s'illuminer. Si l'on fait passer le courant à haute fréquence dans un solénoïde, tout corps placé dans l'intérieur de ce solénoïde sera lui-même parcouru par des courants à haute fréquence. Ainsi représentons la coupe de ce solénoïde par AB (fig. 559), introduisons-y un cercle en cuivre *ab*, aboutissant aux bornes d'une lampe à incandescence L, aussitôt on voit la lampe s'allumer.

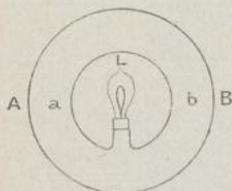


Fig. 559.

L'action des courants à haute fréquence sur l'organisme est encore plus curieuse, ces courants peuvent en effet traverser le corps humain sans produire aucune sensation. Si l'on prend à la main les deux fils provenant d'un solénoïde à haute fréquence on ne sent rien, à la condition de ne faire marcher l'appareil qu'après avoir pris le contact; sans cela, au début, au moment où l'on va saisir le fil, on reçoit une étincelle qui peut donner lieu à une petite brûlure. De même il ne faut pas tenir directement un fil fin qui peut chauffer ou qui localise trop l'action sur la peau, il est bon de terminer ce fil par une tige métallique que l'on prendra à la main. Avec ces précautions deux personnes peuvent se mettre en contact avec les deux bornes du solénoïde à haute fréquence, et prendre de leurs mains libres les deux fils d'une lampe à incandescence qui s'allumera, sans que le courant suffisant pour cela, qui traverse les deux expérimentateurs, ne leur fasse éprouver aucune sensation.

Suivant certains auteurs, le passage des courants à haute fréquence dans le corps de l'homme et des animaux augmenterait l'intensité des combustions qui s'y passent, ce qui se traduirait par un accroissement des échanges gazeux, oxygène consommé et acide carbonique éliminé, mais ces faits ont été contestés et la discussion n'est pas encore tranchée définitivement.

De même ces courants retarderaient certaines cultures microbiennes et pourraient atténuer différents virus; les mêmes réserves doivent être faites sur ce sujet.

Enfin ces courants donneraient lieu à un abaissement de la tension artérielle chez les sujets soumis à leur action, en particulier chez les artério-scléreux pour lesquels ils constitueraient un traitement des plus efficaces. Les espérances que l'annonce de

résultats satisfaisants avaient fait naître n'ont pu être confirmées par d'éminents cardiologues, qui ont observé des sujets hypertendus, avant et après le traitement, et n'ont constaté aucune amélioration de leur état.

XXI

RAYONS X

Si l'on prend un tube ou une ampoule de verre dans laquelle se trouvent soudées deux électrodes de platine et que l'on y fasse un vide suffisant, on voit les parois de cette ampoule prendre une apparence fluorescente verte lorsqu'on la rattache aux pôles d'une forte bobine d'induction en activité.

En étudiant de près les conditions de production de ce phénomène, voici ce que l'on constate.

On sait que lors du fonctionnement d'une bobine d'induction, le courant induit de fermeture et le courant de rupture n'ont pas les mêmes propriétés, c'est ce dernier qui est de beaucoup le plus intense, et c'est pour cela que, quoique fournissant un courant alternatif, la bobine peut être considérée comme ayant deux pôles, un pôle positif et un pôle négatif. Cette classification est donc basée uniquement sur le courant induit de rupture.

Si on relie les deux pôles de la bobine à l'ampoule décrite plus haut il se produit à l'électrode négative, à la cathode, ce que l'on nomme des rayons cathodiques.

Ces rayons cathodiques sont émis normalement à la surface de métal d'où ils partent, ils se propagent en ligne droite et c'est aux endroits où la paroi de verre de l'ampoule est frappée par ces rayons qu'elle devient fluorescente.

Ceci est bien mis en évidence par l'expérience suivante. On prend une ampoule dont la cathode K a la forme plane représentée sur la figure 560, l'anode A étant à une place quelconque du tube. Un petit écran métallique découpé en étoile par exemple,

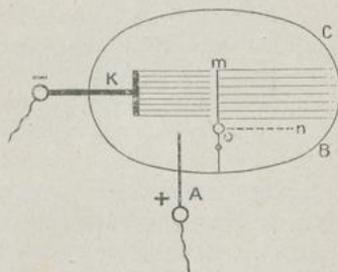


Fig. 560.

mo, est mobile autour d'une charnière *o*, de façon qu'en inclinant le tube on puisse le redresser dans la position *mo* et le faire tomber à plat suivant *no*. On fait fonctionner l'ampoule et l'on constate, quand l'écran *mo* est vertical, qu'il se produit sur la face lumineuse CB du tube une ombre correspondant à cet écran, et à une émission des rayons cathodiques normalement à K; si on renverse l'écran à plat, l'ombre disparaît.

Quand, au lieu de donner à la cathode une forme plane ana-



Fig. 561.



Fig. 562.

logue à celle de la figure précédente, on la fait concave (fig. 561), les rayons cathodiques partent normalement de la surface métallique et forment un foyer *f* au centre de la sphère.

Remarquons que la position et la forme de l'anode n'ont aucune influence sur le phénomène.

Lorsque le foyer *f* se forme sur la paroi de verre du tube, cet

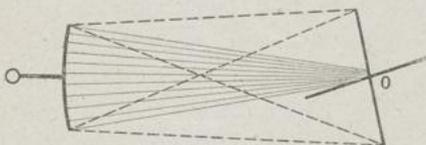


Fig. 563.

endroit devient fluorescent, mais très rapidement il chauffe au point d'incidence des rayons cathodiques, devient rouge, et le tube se perce.

Si dans l'intérieur de l'ampoule on installe un petit moulinet placé de façon que les rayons cathodiques frappent les ailes supérieures, le moulinet se met à tourner comme si l'on venait à souffler sur lui (fig. 562).

Enfin si l'on approche un aimant du tube pendant son fonctionnement les rayons cathodiques sont déviés. Dans l'expérience précédente on peut, en manœuvrant convenablement l'aimant, amener le foyer des rayons cathodiques soit vers les ailes supérieures, soit sur les ailes inférieures du moulinet et en faire varier ainsi à volonté le sens de rotation. Il faut, pour cela, placer l'axe de rotation du moulinet à la hauteur du milieu de la cathode comme l'indique la figure 563, l'expérience réussit alors aisément.

Les points où la paroi de verre du tube est frappée par les rayons cathodiques sont encore le siège d'un autre phénomène très important, en dehors de la fluorescence déjà observée. C'est là que sont émis les rayons X, dont nous étudierons les propriétés plus loin.

En résumé, on obtient donc des rayons X en prenant une ampoule ou tube muni d'une anode quelconque et d'une cathode disposée comme celles de la figure 560 ou 561; on fait le vide dans cette ampoule jusqu'à un degré très avancé. Par l'intermédiaire des électrodes on la relie à une bobine d'induction du modèle de celles qui servent pour les courants à haute fréquence. Les rayons X sont émis par toute la surface de l'ampoule frappée par les rayons cathodiques.

Ces rayons X traversent plus ou moins facilement les corps opaques pour la lumière ordinaire, le papier noir, le carton, le bois, les tissus vivants, etc. Ils sont absorbés davantage par les métaux, surtout les métaux lourds, le plomb, le platine.

D'une façon générale les corps ont pour les rayons X une transparence d'autant moins grande qu'ils sont plus denses. Si donc on place dans une boîte en carton un morceau de métal, les rayons X traverseront facilement le carton, mais seront arrêtés par le métal. De même si on interpose un membre sur le trajet des rayons X, ils traverseront plus facilement la chair que les os.

Or ces rayons X impressionnent les plaques photographiques; de plus ils rendent lumineux, en les frappant, les écrans enduits de certaines substances comme le platino-cyanure de baryum.

Si on pose la boîte contenant un objet de métal sur une plaque photographique et que l'on fasse tomber des rayons X sur le tout, la plaque sensible recevra les rayons partout où ils ne sont pas arrêtés par l'objet en métal, et, au développement, l'ombre de cet objet apparaîtra. De même en répétant cette expérience avec un membre humain, on aura l'ombre des os contenus dans ce membre. C'est le principe de la *radiographie*. Les ombres peuvent aussi s'observer sur un écran recouvert de platino-cyanure de baryum qui deviendra lumineux dans l'obscurité partout où il sera frappé par les rayons X. C'est le principe de la *radioscopie*.

Dès lors, quels sont les inconvénients des tubes primitifs producteurs de rayons X? Les rayons cathodiques frappant la paroi de l'ampoule sur une assez grande surface comme dans le tube de la figure 560, la source de rayons X est très étendue; par conséquent

les ombres portées par les objets sont peu nettes. Nous avons en effet vu, et l'expérience de tous les jours le fait aisément comprendre ainsi que le raisonnement, que les ombres portées par les corps sont d'autant plus précises que la source lumineuse se rapproche davantage d'un point. A mesure que la source lumineuse

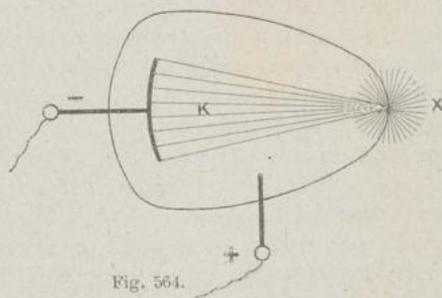


Fig. 564.

devient plus grande, les bords de l'ombre s'estompent de plus en plus. C'est pour remédier à ce défaut des tubes que l'on a tout d'abord remplacé des cathodes planes par des cathodes concaves (fig. 564). Si la courbure de ces cathodes est convenablement choisie, les rayons qui en émanent vont former leur foyer sur la paroi du tube en une région très localisée qui deviendra la source des rayons X (fig. 564).

Ici se présente une nouvelle difficulté. Le point frappé par les rayons cathodiques s'échauffe très rapidement et sitôt que l'on force un peu l'intensité du courant excitateur ou que l'on prolonge un peu la durée de la séance, le tube de verre se perce.

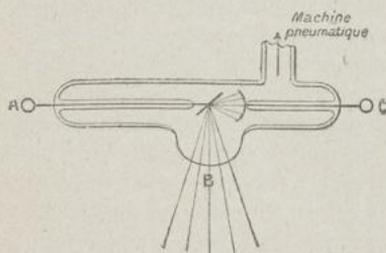


Fig. 565.

Mais le verre n'est pas le seul corps qui, frappé par les rayons cathodiques, donne naissance aux rayons X; d'autres lui sont supérieurs et le platine paraît tenir la première place.

On obtient par suite d'excellents tubes producteurs de rayons X en plaçant au foyer des rayons cathodiques une petite lame de platine dite antikathode; c'est au point où cette antikathode est

frappé
se no
perce
énerg
mais

Pe
par p
intéré

Da
katho
plus

En
les tr
peu p

Po
à me

mesu
de p

dur,
Plus
leme

musc
mais
devie

Da
faut

intér
tube
lard.

gaz,
ampe
rieur

tube
roug
rieur

gaz
gaz,
plati
on c
l'hyo

frappée que se trouve la source de rayons X. Une pareille ampoule se nomme un tube focus (fig. 565); ici on ne risque plus de percer la paroi de verre et l'on peut faire usage de courants très énergiques, il en résulte non seulement des ombres plus nettes, mais aussi une plus grande intensité des rayons émis.

Pendant la marche, l'antikathode chauffe peu à peu, elle finit par passer au rouge et même par fondre si l'on insiste, il y a donc intérêt à lui donner de l'épaisseur.

Dans certains tubes on peut faire passer de l'eau dans l'antikathode creuse afin de la refroidir, le tube peut alors marcher plus longtemps sans arrêt.

Enfin, quel que soit le tube que l'on emploie, focus ou autre, les traces de gaz qui se trouvent dans l'ampoule disparaissent peu à peu pendant la marche, et les propriétés du tube changent.

Pour une certaine pression du gaz, déjà très faible, impossible à mesurer au manomètre, on a une émission de rayons X; à mesure que le vide se fait, la qualité des rayons X se modifie de plus en plus, on dit que le tube devient de plus en plus dur, il faut un courant de plus en plus fort pour franchir ce tube. Plus le tube est dur, plus les rayons X émis par lui traversent facilement les corps opaques. Ainsi, si l'on prend un tube dit mou, les muscles du bras seront plus ou moins traversés par ses rayons, mais les os les arrêteront complètement; à mesure que le tube devient plus dur, les os seront plus transparents.

Dans chaque cas particulier, suivant ce que l'on veut faire, il faut utiliser un tube convenable, plus ou moins dur, il y a donc un intérêt considérable à pouvoir varier à volonté la dureté de ce tube. Ce résultat s'obtient à l'aide de l'osmo-régulateur de Villard. On sait que le platine au rouge se laisse traverser par les gaz, en particulier par l'hydrogène. Si dans la paroi d'une ampoule on a soudé un petit tube de platine ouvert vers l'intérieur du tube et fermé vers l'extérieur, il suffit de chauffer ce tube de platine avec un brûleur de Bunsen pour le porter au rouge et permettre à l'hydrogène de la flamme de passer à l'intérieur du tube (fig. 566). On peut ainsi faire rentrer à volonté du gaz dans l'ampoule quand elle est trop dure. Pour faire sortir du gaz, on coiffe préalablement le tube de platine d'un autre tube de platine plus gros pour le protéger contre les gaz de la flamme et on chauffe l'ensemble. Si à l'intérieur de l'ampoule il y a de l'hydrogène, comme il y a de l'air extérieurement, l'hydrogène

sortira à travers le petit tube de platine chauffé et la pression baissera dans l'ampoule.

On pourra ainsi régler cette ampoule à la dureté voulue.

Pour se rendre compte du degré de dureté de l'ampoule on se sert du spintermètre de Beclère, consistant essentiellement en un excitateur à boules que l'on relie aux électrodes du tube en fonction. On écarte plus ou moins les boules de cet excitateur l'une de l'autre; si le tube est très mou la décharge passe dans le tube aussitôt que l'on écarte tant soit peu les boules. Si, au contraire, le tube est très dur, la décharge passe de préférence dans l'air et il faut écarter beaucoup les boules pour que le tube fonctionne

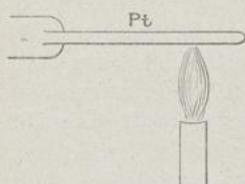


Fig. 566.

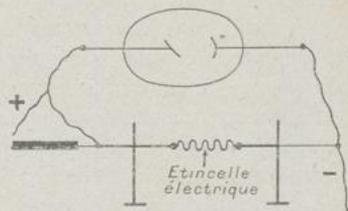


Fig. 567.

(fig. 567). A chaque dureté de tube correspond une longueur d'étincelle équivalente, au-dessous de laquelle le tube ne marche pas; on peut donc, par cette longueur d'étincelle, indiquer la dureté du tube, et avec l'osmo-régulateur revenir toujours à une dureté déterminée.

Nous avons vu que les effets obtenus avec une même ampoule varient suivant le degré du vide; les rayons X ne diffèrent pas seulement entre eux par leur intensité, il y a une question de qualité. Il en est des rayons X comme de la lumière ordinaire qui, en dehors d'une plus ou moins grande intensité, peut être rouge, jaune, verte ou de toute autre couleur, et par ce seul fait jouir de propriétés différentes. Une lumière bleue même très faible traversera une solution d'eau céleste, tandis que cette même lumière bleue, même très intense, sera complètement arrêtée par une solution de bichromate de potasse; l'inverse se produira pour une lumière jaune. Il y a un intérêt considérable à reconnaître la qualité des rayons X émis par une ampoule, cette question est très difficile et n'a encore reçu que des solutions approximatives. On se sert généralement avec avantage du radiochronomètre de Benoist

(fig. 568). Il se compose d'une lame d'argent circulaire autour de laquelle sont disposées d'autres lames d'aluminium d'épaisseur croissante. On place ce petit instrument sur un écran au platino-cyanure de baryum, et l'on fait tomber sur lui les rayons dont on veut déterminer la qualité. On constate que pour les lames d'aluminium épaisses, l'ombre est plus foncée que celle de la lame d'argent; pour les lames d'aluminium minces, c'est le contraire. Il en est une dont l'ombre portée est de même valeur que celle de la lame d'argent, le numéro de cette lame représente une indication de qualité des rayons X. Il est bien évident que cette indication est

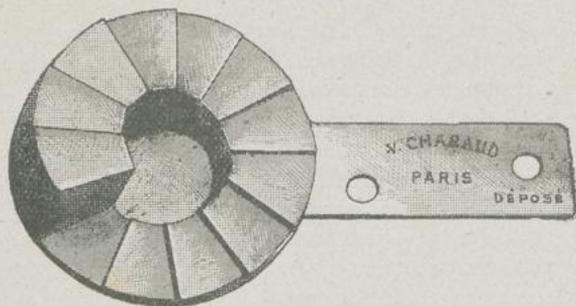


Fig. 568.

absolument arbitraire, elle n'a qu'un seul mérite, c'est de permettre de retrouver la qualité des rayons dont on s'est servi dans une expérience et de l'indiquer à un autre observateur qui pourra se placer dans les mêmes conditions, ce qui est déjà un avantage considérable.

Par exemple on dira : « Les rayons dont on s'est servi correspondent au n° 4 Radiochronomètre de Benoist »; cela voudra dire que leur qualité est telle que l'ombre est égale pour la lame d'argent et la quatrième lame d'aluminium. Chaque fois que cette condition sera réalisée on aura des rayons de même qualité. Les rayons qui correspondent à un numéro faible du Radiochronomètre de Benoist sont peu pénétrants, ils s'absorbent facilement même par les corps peu denses, les tissus vivants comme les muscles, par exemple. A mesure que le numéro croît, les rayons sont de plus en plus pénétrants, ils correspondent à des ampoules de plus en plus dures, et traversent plus facilement les corps relativement denses comme les os.

On a appliqué avec quelque succès les rayons X au traitement de certaines tumeurs malignes.

Il est évident que dans un pareil sujet la question de qualité des rayons et de grandeur de l'action doivent avoir une importance de premier ordre, et c'est pour cela que ces éléments doivent être notés avec soin dans toutes les observations, en même temps que les durées d'application, la fréquence des séances, la distance du tube à la peau, etc.

Les rayons X qui agissent sur les tumeurs ne sont pas sans action sur les tissus sains, ils peuvent produire des accidents assez sérieux si l'on s'y expose trop longtemps. En particulier les personnes qui manipulent fréquemment et longtemps les objets éclairés par les rayons X finissent par avoir de véritables brûlures de la peau des mains. Ces radiodermites, comme on les appelle, ne se produisent pas immédiatement après l'exposition aux rayons X, elles mettent un certain temps à apparaître et sont extrêmement difficiles à guérir. Les personnes victimes d'un premier accident deviennent de plus en plus sensibles, et, si elles persistent à ne point se protéger, finissent par présenter des troubles de la peau parfois effrayants. Au début il n'y a qu'une altération très superficielle avec chute des poils, puis la peau se recouvre de croûtes, les ongles augmentent d'épaisseur, se soulèvent et finissent par tomber. A cette période il faut des années pour voir arriver la guérison, et la moindre imprudence donne lieu à une recrudescence du mal.

On voit qu'il ne faut manier les rayons X qu'avec une grande prudence, d'autant plus qu'il y a des susceptibilités individuelles et qu'il est impossible de formuler des règles mettant à l'abri de tout accident. Il faut être d'autant plus méfiant que, comme il a été dit plus haut, les radiodermites ne se produisent pas au cours de l'application même des rayons ; on ne peut en suivre la marche progressive, c'est plusieurs jours après la séance que tout à coup on les voit apparaître.

L'emploi des rayons X pouvant amener les accidents dont il vient d'être question, on conçoit combien il est important de pouvoir évaluer la grandeur de l'action que l'on a exercée dans une opération, de même que dans la thérapeutique ordinaire on se trouve dans la nécessité de peser les produits dont on fait usage.

Or, certains sels jouissent de la propriété de se colorer ou de changer de couleur quand ils sont soumis à l'action des rayons X.

On a livré dans le commerce des pastilles de composition secrète dues à Holtzknecht que l'on place sur la peau du sujet soumis à l'action des rayons X. A mesure que l'action se prolonge la couleur de ces pastilles change et en la comparant à une échelle établie une fois pour toutes on en déduit que la peau voisine de la pastille a reçu plus ou moins de rayons pendant le temps de l'exposition. Cette quantité de rayons s'évalue au moyen d'une unité arbitraire désignée par la lettre H, unité qui a servi à établir l'échelle de comparaison. Suivant l'indication de cette échelle à laquelle on compare la pastille d'épreuve on dit que la peau a reçu 4H, 2H, 3H, etc. L'expérience prouve qu'à partir de 4H on risque de voir apparaître des troubles à la suite de l'application, il faut donc se tenir au-dessous de cette dose, à moins de raisons spéciales qu'un radiologue expérimenté est seul à même d'apprécier.

Les pastilles de Holtzknecht sont très chères, il devient du reste difficile de s'en procurer. Sabouraud et Noiré les ont remplacées par de petites rondelles de papier enduites de platinocyanure de baryum, qui lui aussi vire de couleur sous l'action des rayons X. Lorsque la pastille a pris une teinte déterminée représentée sur un type on est averti que l'on arrive à la zone dangereuse et qu'il faut arrêter l'opération. Il importe de savoir que la pastille de Sabouraud et Noiré doit être placée pendant l'opération, non sur la peau, mais à moitié de la distance de cette peau à l'antickathode de l'ampoule, sous peine de donner des renseignements complètement faux.

Radium.

Un certain nombre de corps, dont le type est le Radium jouissent de la propriété d'émettre spontanément, d'une façon continue et en apparence indéfinie, des radiations dont les propriétés sont analogues à celles des rayons X. En réalité, le radium émet trois sortes de rayons désignés sous les noms des rayons α , β et γ .

Les rayons γ sont de même nature que les rayons X.

Les rayons β sont de même nature que les rayons cathodiques.

Enfin les rayons α se comportent d'une façon inverse de celle des rayons β dans le champ magnétique.

C'est-à-dire que lorsqu'on cherche à dévier par un aimant le faisceau de rayons émanant du radium, on constate que l'action est nulle sur les rayons γ comme sur les rayons X, tandis que α et β

subissent des déviations de sens contraire, β se déviant comme le feraient des rayons cathodiques.

Les rayons du radium n'ont aucune utilité pratique au point de vue du diagnostic, à ce point de vue les rayons X leur sont bien préférables. Mais on les emploie dans un but thérapeutique; l'ensemble du faisceau de rayons émanés du radium est principalement composé de rayons peu pénétrants, en conséquence son emploi est justifié quand il s'agit de produire une action curative superficielle sans risquer de léser les parties profondes.

Accidents causés par l'électricité.

Les accidents causés par l'électricité industrielle se présentent généralement dans deux conditions différentes.

Ou bien la victime a touché deux points d'un circuit parcouru par un courant, ces deux points se trouvant à un potentiel différent. Par exemple, de la main droite elle sera en communication avec un pôle d'une machine, de l'autre main avec l'autre pôle; le courant passera transversalement d'un bras à l'autre par le tronc. Ce cas se présente extrêmement souvent dans des conditions très variées, entre autres quand il s'est produit une rupture dans un circuit, et que l'on cherche à la réparer sans arrêter le générateur, ou, si le générateur étant arrêté, on le met en marche pendant la réparation. Ou bien, on touche un fil en communication avec une borne de la machine et l'on marche sur un fil de communication avec l'autre borne; ici le courant parcourt le corps dans sa longueur. On peut encore imaginer toutes sortes d'autres variantes qui ne se produisent malheureusement que trop fréquemment dans l'industrie. Ces accidents ont lieu la plupart du temps, non au voisinage de la machine génératrice même, mais à distance, à un tableau de distribution ou sur la ligne. Là le danger est en effet caché. Près de la machine on le prévoit; le générateur est en marche, on est prévenu et l'on se méfie. A un tableau de distribution ou sur la ligne rien n'indique ce qui va se passer, on oublie que telle pièce de métal d'apparence si inoffensive est d'un contact si redoutable, on n'est pas en éveil, et l'accident se produit à la moindre distraction avec une telle rapidité que l'on ne peut l'éviter quand il se présente. C'est pourquoi il faut surtout se méfier des points éloignés des générateurs, c'est là qu'est le danger, c'est là que les accidents se produisent.

En dehors de la prise de la victime dans le circuit, il peut se rencontrer, et il se rencontre souvent un autre cas presque aussi dangereux et plus fréquent, c'est celui de la dérivation au sol. On touche d'une seule main un circuit ne se trouvant pas au même potentiel que le sol, et l'on est foudroyé par un courant allant du circuit à la terre. Considérons un générateur d'électricité, une machine dynamo, dont les bornes sont en A, B (fig. 569), et envoyant dans une ligne un courant allant de A en B. L'on vient à toucher un point du circuit C. Si la borne B n'est pas très isolée du sol sur lequel repose la dynamo, aussitôt le contact établi par la victime entre C et le sol, un courant passe par C et le corps de cette victime, pour retourner à la terre et par là à la borne B. On se met à l'abri de cette cause d'accident en prenant la précaution de s'isoler avec soin, quand il est nécessaire de toucher une canalisation d'électricité. Si l'on est sur une substance mauvaise conductrice, un tabouret à pieds de verre ou simplement une lame épaisse de caoutchouc, on peut impunément toucher un point quelconque d'un circuit parcouru par un courant; on ne risque pas de former une dérivation au sol. Bien entendu il ne faut pas, malgré cet isolement, avoir l'imprudence de se mettre soi-même en circuit en touchant deux points d'une canalisation.

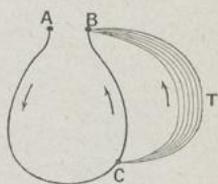


Fig. 569.

Pour ce qui est de la nature des décharges auxquelles on est exposé, on peut dire d'une façon générale que le danger est d'autant plus grand, toutes choses égales d'ailleurs, que l'action se prolonge plus longtemps. Un choc unique, tel que celui qui résulterait de la décharge d'un condensateur, est relativement peu à craindre si elle ne met pas en jeu une quantité d'énergie énorme; cela a lieu dans le coup de foudre, mais ne se rencontre pas dans la pratique industrielle. Il n'en est plus de même si l'électrisation se prolonge, soit que l'on ait affaire au courant continu, soit au courant alternatif; alors les conséquences deviennent très redoutables pour les voltages auxquels on arrive d'une façon courante dans l'industrie. Le danger des courants croît rapidement avec le voltage, ceci est une règle absolue. Il augmente tout d'abord avec le nombre des alternances, pour passer par un maximum et diminuer ensuite. D'après Prevost et Batelli, ce sont les courants de 150 alternances à la seconde qui sont les plus à craindre;

au-dessous et au-dessus de cette fréquence il faut un voltage plus élevé pour produire les mêmes effets nocifs. Le sens dans lequel la décharge traverse les organes ne semble jouer aucun rôle.

Lorsqu'un accident vient à se produire, il faut le plus rapidement possible séparer la victime du circuit et lui faire la respiration artificielle. Cette respiration artificielle peut être inutile par suite de troubles irrémédiables dans les fonctions du cœur, mais il ne faut pas négliger de l'exercer, car c'est la seule intervention utile à laquelle on puisse avoir recours.

Pe
qu'il
vibr
duit
l'ore
Le
solid
peut
rien
Il es
men
mun
robin
clock
se n
éme
paro
catic
sion
com
D
pres
est n
L