CHAPITRE IV

LOIS DES COURANTS

I. — INTENSITÉS DES COURANTS. — LOIS D'OHM ET DE JOULE.

787. Intensités des courants. — Unité pratique d'intensité : ampère. — Nous considérerons l'*intensité* d'un courant comme définie par *la quantité d'électricité qui passe, en une seconde, par une section quelconque du circuit.* — Si, en t secondes, il passe une quantité d'électricité q, l'intensité est exprimée par le nombre $i = \frac{q}{t}$.

Quand on fait usage des unités pratiques C.G.S., q est évalué en coulombs; l'*unité pratique d'intensité* de courant est alors déterminée par la relation précédente, dans laquelle on fera $t=1$ et $q=1$. C'est l'intensité d'un courant tel que, en une seconde, il passe une quantité d'électricité égale à un coulomb, par une section transversale quelconque du circuit. — Cette unité a reçu le nom d'*ampère*.

Pour un courant dont l'intensité serait i ampères, la quantité d'électricité positive débitée en t secondes serait $q=it$ coulombs.

On donne le nom général de *rhéomètres*, aux appareils qui servent à la mesure des intensités des courants. (Quand l'appareil est disposé de manière à donner l'intensité en ampères, on l'appelle plus particulièrement *ampèremètre*.) — On peut grouper les rhéomètres en trois catégories : les *voltamètres*, fondés sur les effets chimiques des courants; les *galvanomètres*, fondés sur les actions exercées par les courants sur les aimants; et les *électrodynamomètres*, fondés sur les actions exercées par les courants sur les courants.

788. Mesure des intensités des courants par le voltamètre. — L'expérience suivante, due à Faraday, montre que la *quantité d'eau* décomposée dans un voltamètre, en un temps déterminé, est proportionnelle à la quantité d'électricité qui le traverse pendant ce temps. — Le courant d'une pile P (*fig.* 562) passe par un circuit qui se subdivise entre les points C et D; dans chacune des branches de la bifurcation, on intercale un voltamètre, v, v'; des voltamètres sont également placés en V et V', sur les parties non divisées du circuit. — L'expérience montre que les quantités d'hydrogène dégagées en V et V' sont *égales entre elles* : c'est ce que nous savions déjà (773). Les quantités d'hydro-

gène dégagées soit en v, soit en v', sont moindres, mais *leur somme est toujours égale à la quantité dégagée en V* : dans le cas particulier où les deux branches de la bifurcation CvD et Cv'D sont identiques, les quantités d'hydrogène dégagées en v et v' sont égales chacune à la moitié de la quantité dégagée en V. Or, dans ce dernier cas, par chacune des branches passe évidemment la moitié de la quantité d'électricité qui passe en AC ou en DB : la quantité d'eau décomposée est donc proportionnelle à la quantité d'électricité transmise.

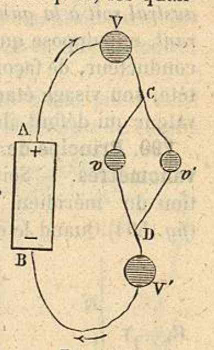

Fig. 562.

On pourra donc, d'une manière générale, obtenir le *rapport* des *intensités* de deux courants, en déterminant le rapport des volumes d'hydrogène qu'ils dégagent, en un même temps. D'autre part, il résulte des déterminations expérimentales, qu'un courant d'un ampère dégage environ 117 millimètres cubes d'hydrogène par seconde, le volume étant mesuré à 0° et sous la pression normale; on pourra donc évaluer l'intensité d'un courant *en ampères*, par la mesure du volume d'hydrogène qu'il dégage, en un temps connu.

Mais l'emploi du voltamètre présente deux inconvénients. — D'une part, si l'intensité d'un courant vient à varier pendant l'intervalle de temps où l'on recueille les produits de l'électrolyse, le voltamètre ne donne que la valeur *moyenne* des intensités qui se sont succédé pendant cet intervalle. — D'autre part, le voltamètre ne peut pas être employé quand la force électromotrice est insuffisante pour décomposer l'eau; ainsi, le courant produit par un seul élément Daniell ne décomposera jamais l'eau d'un voltamètre (774).

Pour mesurer les intensités des courants, il est préférable d'employer des *galvanomètres*, fondés sur l'action que les courants exercent sur les aimants.

789. Expérience d'Œrsted. — Règle d'Ampère. — L'action du courant sur l'aiguille aimantée fut observée pour la première fois, en 1819, par Œrsted. — En plaçant un fil métallique dans une direction parallèle à une aiguille aimantée ab mobile sur un pivot (*fig.* 563), Œrsted vit l'aiguille s'écarter de sa position d'équilibre, quand on faisait passer un courant dans le fil. Le sens de la déviation de l'aiguille dépendait, et de la direction du courant dans le fil, et de la position du fil par rapport à l'aiguille. — La règle suivante, énoncée par Ampère,

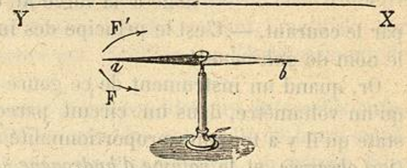

Fig. 563. — Expérience d'Œrsted.

permet de prévoir, dans tous les cas, le sens de la déviation produite :

Un courant rectiligne, agissant sur un aimant, tend toujours à le placer dans une position perpendiculaire à la sienne, et de manière que le pôle austral soit à la gauche du courant. — Pour définir *la gauche du courant*, on suppose que l'observateur se place dans la direction même du conducteur, de façon que le courant entre par ses pieds et sorte par sa tête, son visage étant tourné vers l'aiguille ; c'est la gauche de l'observateur qui définit alors la gauche du courant.

790. Principe de la mesure des intensités des courants par les galvanomètres. — Soit un conducteur rectiligne SN, placé dans la direction du méridien magnétique, au-dessus d'une aiguille aimantée (*fig.* 564). Quand le conducteur est parcouru par un courant, l'aiguille prend une certaine position d'équilibre AB, sous l'action de quatre forces égales et parallèles deux à deux, savoir : deux forces horizontales AT, BT′, dues à l'action de la Terre ; deux forces AC et BC′, dues à l'action du courant : ces dernières forces ne sont pas rigoureusement horizontales, mais on peut les supposer telles, si la distance du conducteur à l'aiguille AB est suffisamment grande par rapport à la longueur AB. La position d'équilibre de l'aiguille est la direction commune des deux résultantes AR et BR′. — Soit α l'angle de déviation de l'aiguille, que l'on pourra mesurer au moyen d'un cercle divisé, placé au-dessous de l'aiguille ; on doit avoir, en remarquant que l'angle TAR est égal à α,

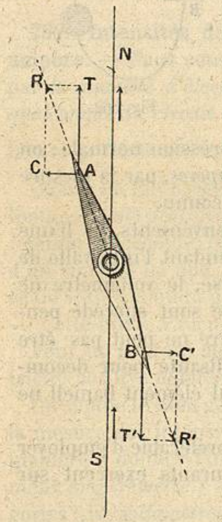

Fig. 564.

$$\tan \alpha = \frac{TR}{AT} = \frac{AC}{AT}.$$

La force AT étant constante, la tangente trigonométrique de la déviation observée est proportionnelle à la force AC qui est due à l'action exercée par le courant. — C'est le principe des instruments qu'on désigne sous le nom de *galvanomètres*.

Or, quand un instrument de ce genre est intercalé, en même temps qu'un voltamètre, dans un circuit parcouru par un courant, on constate qu'il y a toujours proportionnalité entre la *tangente de la déviation observée*, et le *volume d'hydrogène électrolysé* en une seconde. On peut donc obtenir le rapport des intensités de deux courants, traversant successivement un même galvanomètre, par le rapport des tangentes des deux déviations observées.

Les galvanomètres ont l'avantage de donner *à chaque instant* la mesure de l'intensité, alors même que l'intensité varierait d'un instant à un autre. — Enfin, on peut construire des galvanomètres qui donnent des indications sous l'influence de courants très faibles, dont l'action chimique serait inappréciable.

Tout galvanomètre peut servir d'*ampèremètre*, à la condition qu'on ait préalablement déterminé la valeur de tang α qui, pour ce galvanomètre, correspond à un courant d'un ampère.

791. Résistance d'un conducteur. — Si le circuit d'une pile P contient un galvanomètre G (*fig.* 565), et si l'on vient à allonger le circuit en intercalant entre deux points C et D un fil métallique F, on constate que le galvanomètre accuse une *diminution d'intensité* du courant. On doit donc considérer l'introduction d'un conducteur, dans un circuit, comme apportant à la circulation de l'électricité une résistance, qui a pour effet de diminuer l'intensité du courant.

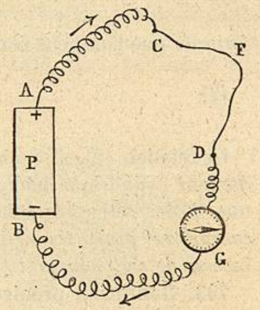

Fig. 565.

Si maintenant on substitue au fil F un autre fil F′, on constate en général, par l'observation du galvanomètre, que la diminution d'intensité du courant n'est plus la même : elle varie, soit avec les dimensions du fil, soit avec sa nature. — En d'autres termes, on doit considérer la *résistance* offerte par un conducteur déterminé comme dépendant à la fois, de sa longueur, de sa section et de sa nature. — C'est ce que nous allons maintenant préciser.

792. Différence des potentiels, aux extrémités d'un fil métallique intercalé dans un circuit. — Formule d'Ohm. — Puisqu'il passe sans cesse de l'électricité positive de l'extrémité C à l'extrémité D du conducteur CFD, intercalé dans le circuit de la pile P (*fig.* 565), le potentiel en C doit être plus grand qu'en D. L'expérience montre en effet que si, sans ouvrir le circuit, on relie l'extrémité D au sol, de sorte que le potentiel en D prenne la valeur zéro, et si l'on met l'extrémité C en communication avec un électromètre à quadrants, l'électromètre accuse un potentiel positif v ; l'intensité du courant, mesurée par le galvanomètre G, n'est d'ailleurs pas modifiée par l'établissement de ces communications.

En répétant cette expérience avec divers conducteurs, intercalés entre C et D, on pourra mesurer la différence v des potentiels de leurs extrémités. D'autre part, dans ces expériences successives, on pourra faire en sorte, ou bien que l'intensité i du courant, mesurée par le galvanomètre, prenne des valeurs différentes, ou bien qu'elle reprenne toujours une même valeur : il suffira, par exemple, de modifier convenablement, dans chaque expérience, la longueur de la portion AC du circuit. — Les expériences de ce genre conduisent aux résultats suivants :

Avec un même conducteur, la différence de potentiel v varie *proportionnellement à l'intensité* i du courant. — Avec des fils de même nature, mais différant, soit par leur longueur l, soit par leur section s, la différence de potentiel v, pour une même valeur de i, varie *proportionnellement à la longueur* l, et *en raison inverse de la section* s. — On a donc, en désignant par k un coefficient qui dépend de la *nature* du conducteur :

$$(1) \qquad v = k\frac{l}{s} \times i,$$

formule que l'on peut écrire

$$(2) \qquad i = v\frac{1}{k}\frac{s}{l}.$$

La relation (2) est la *formule d'Ohm*; elle montre que, pour un conducteur cylindrique homogène, dont les deux extrémités sont maintenues à des potentiels dont la différence v est constante, l'*intensité* i *du courant est proportionnelle à la section* s *de ce conducteur*, et *en raison inverse de sa longueur* l (*).

793. Définition précise de la résistance d'un conducteur. — Dans l'expression (1), le facteur $\frac{kl}{s}$ contient toutes les quantités qui caractérisent le conducteur intercalé dans le circuit : si l'on pose

$$\frac{kl}{s} = r,$$

on peut considérer cette quantité r comme définissant la *résistance* du conducteur. — L'expression (2) devient alors

$$(3) \qquad i = \frac{v}{r}.$$

794. Unité pratique de résistance : ohm. — Si, dans la formule précédente, on fait $i = 1$ et $v = 1$, il vient $r = 1$. L'*unité de résistance* est donc celle d'un conducteur qui sera parcouru par un courant d'intensité égale à l'unité, lorsque les deux extrémités de ce conducteur présenteront une différence de potentiel égale à l'unité.

En particulier, quand on fait usage des unités pratiques d'électricité, on doit prendre comme *unité pratique de résistance*, celle d'un conducteur qui est parcouru par un courant d'un ampère, lorsque ses deux extrémités présentent une différence de potentiel d'un volt. — Cette unité a reçu le nom d'*ohm*.

(*) Ohm a été conduit à cette formule en considérant l'analogie que présente le phénomène du courant électrique avec la propagation de la chaleur (622).

Il résulte de déterminations expérimentales qui ne peuvent être indiquées ici, que l'ohm peut être représenté par la *résistance à 0° d'une colonne de mercure ayant un millimètre carré de section et* 106 *centimètres de longueur*.

795. Étalons de résistance. — Boîtes de résistances. — D'après ce qui vient d'être dit, on pourrait construire un *ohm étalon*, en prenant un tube de verre de 1 millimètre carré de section, et en y introduisant une colonne de mercure de 106 centimètres de longueur; des fils de platine, plongeant dans le mercure à ses extrémités, permettraient d'introduire la colonne de mercure dans le circuit d'un courant. — Mais cet étalon rectiligne serait peu commode. La figure 566 représente un étalon dont le tube est replié plusieurs fois. Pour les expériences précises, on a soin de l'entourer de glace fondante, la résistance du mercure éprouvant des variations sensibles avec la température.

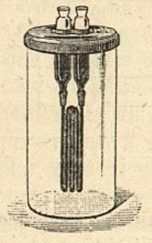

Fig. 566
Étalon de l'ohm légal.

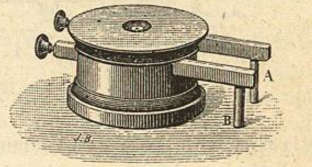

Fig. 567.
Ohm pratique, en fil de maillechort.

Enfin, en raison de la fragilité des instruments de verre, il est préférable de construire les *étalons pratiques* avec des fils métalliques. On choisit le maillechort, dont la résistance varie fort peu avec la température. La figure 567 représente un de ces étalons : le fil est enroulé sur une bobine de bois, contenue dans un étui; ses deux extrémités sont soudées à des tiges coudées A, B, que l'on peut plonger dans deux godets de mercure, pour établir les communications.

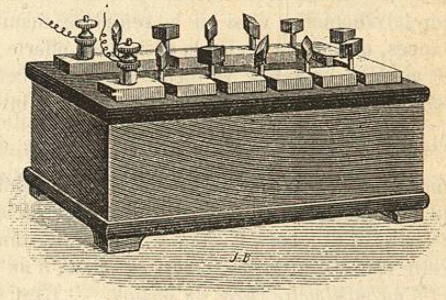

Fig. 568. — Boîte de résistances.

On construit également des bobines dont la résistance est 2, 3, 4, 5, 10, 100, 1000 fois celle de l'ohm. C'est avec ces bobines que l'on forme des *boîtes de résistances* (*fig.* 568), qui permettent de faire varier la résistance introduite dans un circuit, et d'évaluer cette résistance par une simple lecture. — Les pièces de cuivre successives A, B, C,... I, K, L (*fig.* 569) peuvent être mises en communication par des chevilles métalliques D, E,... F, G; quand ce conducteur ABC... KL est intercalé dans un circuit, il n'a aucune résistance appréciable. Au-dessous de la cheville D, est placée, dans la boîte, une bobine de résistance connue, dont le fil est soudé par ses extrémités aux deux pièces A et B; si l'on

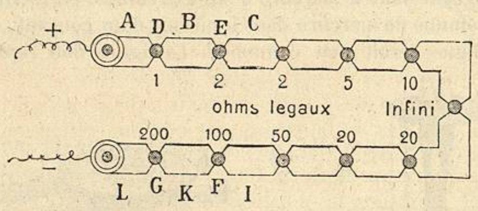

Fig. 569.

enlève la cheville D, on introduit dans le circuit la résistance de cette bobine. A chaque cheville, correspond ainsi une bobine placée au-dessous d'elle, et le nombre d'ohms qui représente la résistance de la bobine est marqué sur la cheville même. — Il suffit donc, dans chaque cas, d'additionner les nombres lus sur les chevilles enlevées, pour connaître la résistance introduite dans le circuit.

796. Coefficients de résistance des corps solides. — Si l'on introduit un fil CFD (fig. 565), ayant une longueur de l mètres et une section de s millimètres carrés, dans un circuit comprenant une pile et un galvanomètre, et si on le remplace ensuite par une boîte de résistances, on pourra régler la résistance offerte par la boîte de façon que le courant reprenne la même intensité: cette résistance, évaluée *en ohms*, fera connaître la résistance r du fil lui-même (*). La quantité r étant connue, ainsi que l et s, la formule de définition $r = k\frac{l}{s}$ permettra de calculer le coefficient k, pour la substance dont est formé le fil. — Quant à la signification de ce coefficient, on voit que si l'on fait $l = 1^m$, et $s = 1^{mmq}$, il vient $k = r$, c'est-à-dire que k représente, pour cette substance, *la résistance, en ohms, d'un fil d'un mètre de longueur et d'un millimètre carré de section.* — C'est ce qu'on appelle le *coefficient de résistance* de la substance dont il s'agit.

Le tableau suivant donne les coefficients de résistance, classés par

(*) Nous indiquerons plus loin (808) une méthode de détermination plus précise de la résistance d'un conducteur.

ordre de valeurs croissantes, pour les corps solides les plus employés comme conducteurs.

	RÉSISTANCE en ohms.		RÉSISTANCE en ohms.
Argent recuit.	0,017	Étain comprimé	0,146
Cuivre.	0,018	Plomb comprimé.	0,217
Or.	0,023	Antimoine comprimé. . . .	0,392
Aluminium.	0,033	Mercure	0,944
Zinc comprimé.	0,062	Bismuth comprimé.	1,448
Platine.	0,100	Coke.	45
Fer recuit	0,107	Charbon de cornue. . . .	703

On voit que, à égalité de dimensions, les fils de fer offrent une résistance environ six fois plus grande que les fils de cuivre. — La résistance du charbon de cornue ou des charbons agglomérés, qu'on emploie pour les piles de Bunsen ou pour la production de la lumière électrique, est plusieurs centaines de fois plus grande.

797. Coefficients de résistance des liquides. — Les liquides, en général, présentent, à dimensions égales, des résistances incomparablement plus grandes que les corps solides. Voici quelques nombres qui en pourront donner une idée, pour quelques-unes des solutions les plus employées en électricité. — Ces nombres représentent, comme les précédents, les *résistances en ohms*, pour des colonnes d'un mètre de longueur et d'un millimètre carré de section.

	RÉSISTANCE en ohms.
Acide azotique à 36° de l'aréomètre de Baumé.	21 560
Solution saturée de sel marin (température 13°).	64 000
— — sulfate de zinc (température 14°). . .	349 700
— — — de cuivre (température 9°). .	372 300
Eau acidulée $\left(\frac{1}{20\,000}\right.$ d'acide sulfurique$\left.\right)$.	15 700 000

La grandeur de ces nombres fait comprendre pourquoi, quand on intercale une colonne liquide dans le circuit d'une pile, il faut toujours lui donner une grande section et une petite longueur, si l'on veut que le courant conserve une intensité appréciable.

798. Résistance de la pile. — Prenons un élément de pile à tasses (fig. 528), dont les fils P et N seront réunis par un conducteur dans lequel sera intercalé un galvanomètre. Si l'on vient à éloigner progressivement les lames l'une de l'autre, on constate que l'intensité du courant diminue; le liquide, qui, *dans l'élément de pile*, est placé entre les deux lames métalliques, se comporte donc, au point de vue des variations d'intensité du courant, comme se comporterait une couche liquide interposée dans la partie extérieure du circuit. — D'une manière générale, le circuit d'une pile étant fermé par un conducteur quelconque, la résistance *intérieure* de la pile intervient dans la valeur de l'intensité acquise par le courant, au même titre que les résistances *extérieures*.

799. Résistance totale d'un circuit. — Étant donnée une pile formée d'éléments quelconques, et placée dans un circuit quelconque, on conçoit que l'on puisse évaluer séparément la résistance $\frac{kl}{s}$ de chacun des éléments de pile, à la condition de connaître leurs dimensions et les coefficients de résistance k relatifs aux liquides qu'ils contiennent; la somme des résistances de tous les éléments donnera la *résistance intérieure* de la pile. — On peut évaluer de même la *résistance extérieure*, en faisant la somme de tous les termes $\frac{kl}{s}$ relatifs à chacun des fils conducteurs qui, réunis bout à bout, constituent le circuit extérieur. — La somme de ces résistances, intérieure et extérieure, sera la *résistance totale* du circuit.

800. Lois d'Ohm. — Supposons que l'on ait évalué, en ohms, la résistance intérieure R d'une pile, et que, au moyen d'un électromètre à quadrants, on ait mesuré, en volts, la différence de potentiel E qui existe entre les deux pôles quand le circuit est ouvert: le nombre E est ce que nous avons appelé la *force électromotrice* de la pile (753). Si l'on vient à réunir les deux pôles par un conducteur de résistance connue r, la différence de potentiel aux deux pôles prend une valeur v, plus petite que E (752), que l'on peut déterminer encore au moyen de l'électromètre à quadrants. Dans tous les cas de ce genre, l'expérience montre que *le rapport de la différence v des potentiels pris aux deux pôles de la pile, en circuit fermé, à la différence E des potentiels pris aux deux pôles, en circuit ouvert, est toujours égal au rapport de la résistance extérieure r à la résistance totale $R + r$*; c'est-à-dire qu'on a:

$$\frac{v}{E} = \frac{r}{R + r}.$$

Or, d'après ce qu'on a vu (793, formule 3), l'intensité du courant, dans le conducteur extérieur, est exprimée en ampères par $\frac{v}{r}$; c'est aussi l'intensité du courant dans tout le reste du circuit. Mais, d'après la relation qui précède, on a $\frac{v}{r} = \frac{E}{R + r}$; par suite, l'intensité du courant peut être représentée par l'expression générale

$$i = \frac{E}{R + r},$$

qui met en évidence, d'une part, l'influence de la force électromotrice de la pile; d'autre part, l'influence de la résistance intérieure de la pile et celle de la résistance extérieure.

De cette relation, découlent les deux lois suivantes, connues sous le nom de *lois d'Ohm* :

1° *L'intensité du courant est proportionnelle à la force électromotrice de la pile.*

2° *Elle est inversement proportionnelle à la résistance totale du circuit.*

801. Vérifications expérimentales. — La seconde loi a été établie expérimentalement par Pouillet, en opérant avec diverses espèces de piles. — Nous nous contenterons d'indiquer le principe de la méthode.

Le cas le plus simple est évidemment celui où la résistance intérieure de la pile est *négligeable* par rapport aux résistances extérieures. C'est le cas des piles *thermo-électriques* (*fig.* 546): les lames métalliques ou les barreaux qui forment les éléments peuvent être considérés comme ayant une résistance négligeable, par rapport à celle des fils longs et fins qui ferment le circuit. C'est dans ces conditions qu'ont été effectuées les expériences d'Ohm, et aussi les premières expériences de Pouillet. — Or, supposons qu'on ferme successivement le circuit d'une pile thermo-électrique avec différents fils, de résistances connues, et que le circuit contienne un galvanomètre, dont la résistance soit également connue. Si, dans deux expériences consécutives, on représente par i et i' les intensités du courant, mesurées au galvanomètre, et par r et r' les résistances *totales* des conducteurs extérieurs à la pile, y compris celle du fil du galvanomètre, on trouve toujours

$$\frac{i}{i'} = \frac{r'}{r},$$

c'est-à-dire que *les intensités du courant sont en raison inverse des résistances du circuit.*

Supposons maintenant qu'on opère de même avec une pile *hydro-électrique*, dont on ait mesuré la résistance R, et qu'on fasse deux expériences avec des circuits extérieurs ayant des résistances r et r', y compris celle du fil du galvanomètre: on trouve, pour le rapport des intensités i et i',

$$\frac{i}{i'} = \frac{R + r'}{R + r}.$$

On peut donc dire, d'une manière générale, que les intensités des courants produits *par une même pile*, dans des circuits diversement constitués, *sont en raison inverse des résistances du circuit tout entier, pile comprise.*

802. Chaleur dégagée dans une partie déterminée du circuit. — Loi de Joule. — Considérons une pile dont les deux pôles présentent, en circuit ouvert, une différence de potentiel de E volts; si on la place dans un circuit fermé, et si la résistance *totale* du circuit est de R ohms, l'intensité du courant est exprimée, en ampères, par $i = \frac{E}{R}$; la quantité d'électricité qui traverse le circuit pendant t secondes, est exprimée, en coulombs, par $q = it$.

Or, on a vu (753) que, pour chaque coulomb mis en mouvement dans la pile, le travail des forces électriques de contact est de E joules ; dès lors, pendant t secondes, le travail des forces électriques de contact, c'est-à-dire la diminution d'énergie potentielle de la pile, sera représentée, en joules, par $W = qE$, ou

$$W = E \cdot it.$$

Cette énergie disparue dans la pile doit apparaître dans les diverses parties du circuit. — Considérons, en particulier, une portion déterminée du circuit extérieur, et soit r sa résistance en ohms : ses deux extrémités présentent une certaine différence de potentiel de v volts, telle que l'on ait $\frac{v}{E} = \frac{r}{R}$ (800). Pour chaque coulomb transporté d'une extrémité de ce conducteur à l'autre, le travail des forces électriques est exprimé par v ; pour le nombre de coulombs q, ou it, transportés en t secondes, le travail, exprimé en joules, est

$$w = v \cdot it ;$$

c'est l'expression de l'énergie qui doit apparaître dans le conducteur considéré. — On voit que le rapport de cette énergie w qui apparaît dans ce conducteur de résistance r, à l'énergie W qui a disparu dans la pile pendant le même temps, est égal à $\frac{v}{E}$ ou à $\frac{r}{R}$. En d'autres termes, l'énergie potentielle consommée dans la pile, et transformée en énergie électrique, est transmise à chacune des portions du circuit *proportionnellement à sa résistance*.

Si le courant ne produit ni électrolyse, ni mouvement extérieur, cette énergie apparaît sous forme de *chaleur* dégagée. L'équivalent mécanique de la petite calorie étant 4,17 joules, la quantité de chaleur dégagée dans le conducteur considéré sera, en petites calories, $\frac{w}{4,17}$, ou $\frac{v.it}{4,17}$. — Enfin, on peut introduire dans cette expression, au lieu de v, sa valeur en fonction de la résistance r du conducteur. On a vu (793, formule 3) que l'on a $i = \frac{v}{r}$, d'où $v = ir$; l'expression de l'énergie qui apparaît dans ce conducteur devient alors

$$w = i^2rt,$$

et la quantité de chaleur dégagée en t secondes, dans le conducteur considéré, est exprimée par $\frac{i^2rt}{4,17}$. De là, cette loi :

La quantité de chaleur dégagée, dans l'unité de temps, par un courant électrique, dans un conducteur déterminé, est proportionnelle au carré de l'intensité du courant, et à la résistance du conducteur.

Cette loi, que nous venons de déduire de la loi d'Ohm, a été obtenue directement par Joule, au moyen de mesures calorimétriques : elle est connue sous le nom de *loi de Joule*.

Les résultats généraux des expériences suivantes sont conformes à cette loi :

Si, dans un circuit parcouru par un courant un peu intense, sont placés, à la suite les uns des autres, des fils de platine, de fer, de cuivre, d'argent, ayant tous *même section*, on observe qu'ils s'échauffent très inégalement. Les fils de fer ou de platine peuvent être portés à l'incandescence, sans que les fils de cuivre ou d'argent deviennent lumineux : le tableau de la page 645 montre en effet que la résistance, par unité de longueur, est environ six fois plus grande pour le fer ou le platine que pour l'argent ou le cuivre.

Si l'on intercale, dans le circuit d'une pile formée de quelques éléments Bunsen, un fil fin, de fer ou de platine, ce fil devient incandescent, et peut même fondre ou se volatiliser si le courant a une intensité suffisante ; les gros fils de cuivre, qui forment le reste du circuit, s'échauffent généralement peu, leur coefficient de résistance étant beaucoup moindre, et leur section étant beaucoup plus grande.

Le charbon ayant un coefficient de résistance considérable, un fil fin de charbon peut devenir incandescent sous l'action d'un courant dont l'intensité n'est pas très considérable : c'est sur cette propriété que sont fondées les lampes électriques à incandescence.

II. — DIVERS MODES D'ASSOCIATION DES ÉLÉMENTS DE PILE. COURANTS DÉRIVÉS.

803. Association des éléments de pile en série. — Le mode d'association que nous avons employé jusqu'ici, pour les éléments de pile, est connu sous le nom d'*association en série*, ou *en tension*. — Prenons n éléments identiques, soit e la force électromotrice en volts et ρ la résistance en ohms, de chacun d'eux ; réunissons ces éléments par les pôles de noms contraires (*fig.* 570), et fermons le circuit par un conducteur C, de résistance r. La force électromotrice de la pile tout entière étant $E = ne$, et la résistance totale du circuit étant $R = n\rho + r$, l'intensité du courant est, d'après les lois d'Ohm (800) :

$$I = \frac{ne}{n\rho + r}.$$

Ce mode d'association convient spécialement au cas où le conducteur extérieur présente une résistance *très grande* par rapport à celle de la pile. — En effet, en considérant $n\rho$ comme négligeable vis-à-vis de r, on a sensiblement $I = \frac{ne}{r}$, c'est-à-dire que l'intensité est sensiblement proportionnelle au nombre des éléments (*).

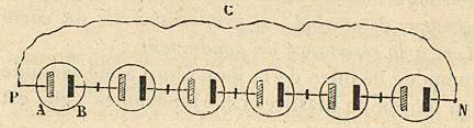

Fig. 570. — Association en série.

804. Association des éléments de pile en batterie — On désigne sous le nom d'*association en batterie* ou *en surface*, le mode d'association dans lequel les pôles de même nom sont réunis entre eux (*fig.* 571), de sorte que le conducteur extérieur C réunit l'ensemble P de tous les pôles positifs, à l'ensemble N de tous les pôles négatifs. — Si l'on considère un système formé de n éléments égaux, de résistance ρ, ainsi associés, le système se comporte comme *un seul élément*, dont les lames auraient une surface n fois plus grande. Par suite, puisque la résistance d'une colonne liquide est en raison inverse de sa section, la résistance de cet *élément multiple* est $\frac{\rho}{n}$. Mais, comme la force électromotrice d'un élément de pile est indépendante de sa surface, et ne dépend que de la nature des corps qui le forment, la force électromotrice de cet élément multiple sera toujours e. Si donc on désigne par J l'intensité du courant produit, on aura, en désignant par r la résistance du conducteur C :

$$J = \frac{e}{\frac{\rho}{n} + r}.$$

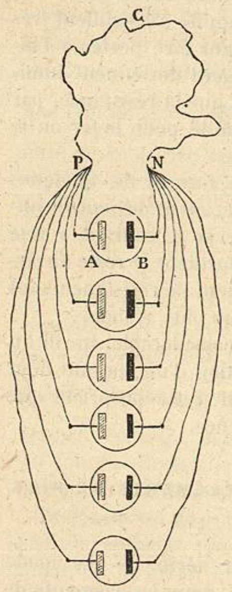

Fig. 571.
Association en batterie.

Ce mode d'association *en surface*, qui est celui où la pile offre le moins de résistance, convient spécialement au cas où le conducteur extérieur présente une résistance *très petite* par rapport à celle de chacun des éléments de la pile. — En effet, en

(*) C'est toujours *en série* qu'on associe les couples *thermo-électriques*, quand le courant doit traverser des fils métalliques fins, incomparablement plus résistants que les couples eux-mêmes. — C'est encore en série que l'on associe les couples *hydro-électriques*, quand le courant doit traverser des corps présentant une résistance considérable, comme des colonnes liquides d'une certaine épaisseur.

considérant r comme négligeable vis-à-vis de $\frac{\rho}{n}$, on a sensiblement $J = \frac{ne}{\rho}$, ce qui montre que, dans ce cas, l'intensité J est sensiblement *proportionnelle au nombre des éléments* (*).

805. Association des éléments de pile en plusieurs séries, réunies en batterie. — Entre les deux cas extrêmes que nous avons spécialement considérés, se présentent des cas intermédiaires, où la résistance du conducteur extérieur est comparable à celle d'un ou plusieurs éléments de la pile. On groupe alors les éléments en un certain nombre de séries, et l'on réunit en batterie ces séries successives. — Si l'on a, par exemple, six éléments, on pourra les réunir, ou en deux séries formées chacune de trois éléments (*fig.* 572), ou en trois séries formées chacune de deux éléments (fig. 573). — Le calcul montre que, dans

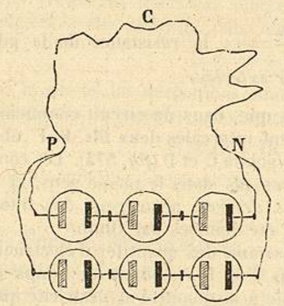

Fig. 572.

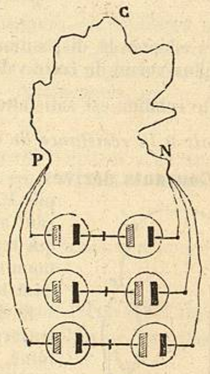

Fig. 573.

chaque cas particulier, la disposition qui donne le courant d'intensité maximum est celle pour laquelle *la résistance de la pile est aussi voisine que possible de la résistance du conducteur extérieur.*

Soit N le nombre total des éléments dont on dispose ; désignons par m le nombre des éléments de chaque série, et par n le nombre des séries accouplées en batterie, en sorte qu'on ait $m \times n = N$. — D'après ce qui précède, chaque série a alors une force électromotrice me et une résistance $m\rho$: dès lors, la batterie

(*) L'association *en surface* convient, par exemple, au cas où l'on veut, avec des piles hydro-électriques, amener à l'incandescence des fils métalliques, toujours beaucoup moins résistants que la pile elle-même. — C'est pour la même raison qu'il y a avantage, dans les expériences de ce genre, à employer des éléments à *grande surface*. Ainsi, un simple couple de Wollaston suffit pour fondre un fil de platine fin (*fig.* 559) qui serait à peine rougi par une pile à colonne, formée d'un grand nombre d'éléments à petite surface.