

peut supporter impunément une décharge qui tuerait un chat.

Les effets physiologiques de la foudre sont comparables à ceux d'une décharge électrique dans laquelle le potentiel et surtout la quantité d'électricité auraient des valeurs considérables. Lorsqu'un homme est tué par la foudre, son cadavre entre rapidement en putréfaction ; le sang extrait de ses veines a perdu la faculté de se coaguler. Si la commotion n'a pas été mortelle, la personne atteinte peut conserver longtemps une grande faiblesse par suite de l'ébranlement du système nerveux. C'est peut-être à la foudre que sont dus les premiers effets *thérapeutiques* de l'électricité : nous lisons dans le *Traité de Physique de Daguin*, qu'en 1762 un pasteur de Kent fut guéri par un coup de foudre d'une paralysie et qu'en 1819 un Niortais aurait été débarassé, également par la foudre, d'un rhumatisme au bras gauche dont il souffrait depuis plusieurs années.

## CHAPITRE II

### COURANTS VOLTAÏQUES

Courant électrique. — Pile de Volta. — Propagation de l'électricité. — Circuits multiples. — Lois de Kirchhoff. — Loi de Joule. — Résistance intérieure d'une pile. — Electrolyse. — Polarisation des électrodes. — Force électromotrice et polarisation de la pile. — Piles à deux liquides. — Groupement des éléments de pile. — Applications. — Thermo-électricité. — Accumulateurs. — Effets physiologiques des courants. — Résistances du corps humain.

16. *Courant électrique.* — Prenons deux conducteurs sphériques, de même nature et de même diamètre, et donnons leur des charges égales d'électricité, positive sur le premier et négative sur le second. S'ils sont mis instantanément en communication par un fil de cuivre, touchant respectivement leurs surfaces par ses deux bouts, il semblera que les deux électricités contraires voyagent rapidement à travers le fil pour arriver à s'entredétruire. Ce double voyage des fluides antagonistes nous donne nettement l'idée d'un *courant électrique*. La durée de ce courant est bien éphémère, il est pour ainsi dire instantané ; mais supposons que, par un moyen quelconque, nous puissions compenser constamment les pertes de charge des deux sphères, de façon à conserver aux deux charges leurs valeurs primitives, nous obtiendrons un courant électrique durable et permanent. Nous aurons à la fois un débit continu d'électricité positive allant de l'origine du fil de cuivre vers son extrémité, et un débit continu d'électricité



négative allant de l'extrémité de ce fil vers son origine. A travers une section droite de ce fil conducteur, il passe à chaque instant des quantités égales de fluide positif et de fluide négatif ; il suffit donc, pour caractériser ce double courant, d'indiquer le sens du courant positif et son débit par seconde.

Comparons ce phénomène à celui d'un écoulement liquide dans un petit tuyau cylindrique faisant communiquer entre eux deux vases remplis d'eau dont la différence de niveau est maintenue constante par un approvisionnement extérieur. La cause de l'écoulement du liquide est la différence des niveaux des surfaces de l'eau dans les deux vases ; la cause du courant électrique est la différence des potentiels des deux conducteurs sphériques. Pour obtenir l'écoulement liquide continu, il faut disposer d'une différence de niveau ou *hauteur de chute* et d'une *source alimentaire* ; de même, pour obtenir le courant électrique continu, il faut disposer d'une différence de potentiel ou *force électromotrice* et d'une *source d'électricité* ; ces deux facteurs nécessaires, une pile électrique peut les fournir.

17. *Pile de Volta*. — Sulzer a publié en 1767, dans sa *Théorie générale du plaisir*, l'expérience suivante. Prenant deux petits disques, l'un de zinc et l'autre de cuivre, on les place respectivement des deux côtés de la langue, puis on rapproche leurs bords extérieurs jusqu'au contact ; on ressent aussitôt une saveur acide au point de la langue touché par le zinc et une saveur alcaline au point touché par le cuivre. Cette expérience parut sans doute intéressante et peut-être amusante, mais on ne soupçonna pas, à cette époque, qu'elle avait une haute portée et renfermait implicitement la découverte de la pile. La force électromotrice est produite par le contact des deux métaux

zinc et cuivre ; la source d'électricité réside dans les actions chimiques des humeurs de la langue sur les deux métaux ; il suffirait, au lieu de faire toucher les deux rondelles métalliques par leurs bords extérieurs, de faire communiquer leurs surfaces libres au moyen d'un fil de cuivre pour obtenir un petit courant électrique dans ce conducteur ; tout cela est facile à saisir aujourd'hui, mais il aurait fallu du génie pour s'en rendre compte au temps de Sulzer ; on possédait un trésor, mais sa valeur intrinsèque restait ignorée.

Une vingtaine d'années plus tard, en 1786, Galvani, professeur d'anatomie à Padoue, qui faisait des recherches expérimentales en vue d'établir l'identité de l'électricité et du fluide nerveux, observa par hasard un fait singulier. Voulant savoir quels effets la décharge des nuages orageux produirait sur les membres dépouillés d'une grenouille fraîchement tuée, il avait suspendu les membres inférieurs de cet animal au balcon d'une terrasse, au moyen d'un crochet de cuivre qui traversait la colonne vertébrale. Il vit avec surprise une agitation convulsive se produire en l'absence de tout orage et constata que les convulsions correspondaient aux contacts accidentels des pattes de la grenouille avec le fer du balcon. Cette observation suggéra à Galvani la célèbre expérience qui consiste à mettre en communication les muscles et les nerfs lombaires d'une grenouille au moyen d'un arc métallique ; les contractions musculaires se produisent au moment même où l'on établit cette communication ; elles deviennent plus vives si l'arc conducteur, au lieu d'être homogène, est formé de deux branches en métaux différents.

L'explication que Galvani donna au sujet de ce singulier phénomène peut se résumer ainsi : *il y a, dans les nerfs de la grenouille, un fluide vital identique avec le fluide électrique, qui produit la commotion en passant des*



*nerfs dans les muscles au moyen du conducteur métallique.* Le succès de cette théorie fut d'abord très-grand, mais il ne fut pas durable.

En 1794, Volta, professeur à Pavie, qui répétait soigneusement les expériences de Galvani, dirigea principalement ses méditations sur la nécessité d'employer deux métaux différents dans le conducteur pour obtenir des contractions énergiques et proposa à l'explication suivante : *le contact des deux métaux, détruisant l'équilibre de leur fluide neutre, électrise l'un deux positivement et l'autre négativement ; c'est en se recombinaut dans le corps de la grenouille que ces deux fluides déterminent les contractions.* Volta donnait à cette action mystérieuse du contact de deux métaux le nom de *force électromotrice* que la science a conservé.

Il est aujourd'hui bien constaté que *le simple contact de deux métaux différents suffit pour créer une différence entre leurs potentiels respectifs.* Cette différence est indépendante de la forme et de l'étendue du contact, mais elle dépend de l'état des surfaces des deux métaux.

Soient A et B deux métaux en contact et désignons par le symbole A|B la variation de potentiel qui se produit en faveur de A ; on a identiquement

$$B|A = -A|B.$$

Formons une chaîne de métaux A, B, C, . . . L, M, avec contacts successifs ; la différence de potentiel entre les deux métaux extrêmes A et M sera

$$A|B + B|C + \dots + L|M ;$$

cette valeur est indépendante de la forme de la chaîne. Mettons maintenant le métal M en contact avec le premier métal A, en fermant la chaîne sur elle même ; la force électromotrice totale sera nécessairement nulle dans ce circuit

fermé ; s'il en était autrement, on obtiendrait dans ce circuit un courant électrique permanent, sans faire aucune dépense d'énergie, en sorte que l'on aurait résolu l'insoluble et chimérique problème du mouvement perpétuel. On a, par conséquent,

$$A|B + B|C + \dots + L|M + M|A = 0,$$

d'où l'on déduit

$$A|B + B|C + \dots + L|M = -M|A = A|M ;$$

par conséquent, *la différence des potentiels des métaux extrêmes A et M est la même que si ces deux métaux étaient directement en contact.* C'est là ce qu'on appelle *la loi des contacts successifs.*

Le contact du zinc et du cuivre donne, en faveur du zinc, un excédant de potentiel de 0 volt 86 si les surfaces des deux métaux sont écrouies, et de 0 volt 68 si elles ne le sont pas.

C'était donc une découverte bien réelle que celle de la force électromotrice de contact, dont Volta nous a révélé l'existence ; cela donnait un grand poids à l'explication, incomplète cependant, qu'il avait donnée au sujet des contractions musculaires de la grenouille. Mais, de son côté, Galvani continuait à préconiser sa théorie du fluide vital ; aidé dans ses expériences par son neveu Aldini, il obtint un jour les contractions sans le secours d'aucun arc métallique, en mettant directement quelques parties des muscles de la grenouille en contact avec ses nerfs lombaires. Cette nouvelle expérience, qui semblait à première vue, renverser la théorie de Volta, ne fit qu'en provoquer la généralisation suivante : *c'est non seulement le contact de deux métaux, mais plus généralement le contact de deux corps hétérogènes quelconques qui produit une force électromotrice.*

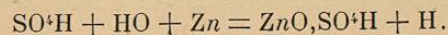


Les discussions continuèrent longtemps encore entre les deux écoles qui avaient respectivement pour chef Galvani et Volta. Elles cessèrent lorsque ce dernier découvrit que les convulsions de la grenouille se produisent aussi bien lorsque l'on supprime la communication des muscles et des nerfs que lorsqu'on l'établit, fait que la théorie de Galvani ne put expliquer.

Cet aperçu historique permet d'apprécier les droits respectifs des hommes de génie aux travaux desquels nous devons la découverte de la pile électrique. C'est à juste titre que les noms de Galvani et de Volta sont immortalisés ; peut-être a-t-on trop laissé dans l'oubli celui de Sulzer.

Prenons deux rondelles de même diamètre, l'une de zinc et l'autre de cuivre, intercalons entre elles une rondelle de drap humectée d'eau acidulée à l'acide sulfurique et faisons communiquer les surfaces métalliques extérieures des deux rondelles au moyen d'un fil de cuivre. Nous aurons une pile électrique à laquelle on donne le nom de *couple Volta*. La force électromotrice est développée par le contact du fil de cuivre avec la rondelle de zinc ; l'action chimique de l'acide sulfurique sur le zinc engendre une énergie chimique qui se transforme en *énergie électrique* et constitue la source d'électricité ; nous nous trouvons donc en possession des deux facteurs nécessaires pour qu'un courant se produise et passe dans le fil conducteur. Substituons, dans l'expérience indiquée par Sulzer, une rondelle de drap humide à la langue d'un homme, nous obtenons un couple Volta ; nous trouvons ainsi dans une expérience de physiologie l'origine de la pile électrique.

La combinaison de l'acide sulfurique hydraté avec le zinc produit du sulfate de zinc et dégage de l'hydrogène, suivant la formule chimique.



Cette combinaison est *exothermique*, c'est-à-dire qu'elle se fait avec dégagement de chaleur. Nous trouvons, dans les tables thermo-chimiques de l'*Annuaire du Bureau des Longitudes*, les indications suivantes relatives à cette réaction.

	Calories gramme (1)
La formation d'un équivalent d'oxyde de zinc (ZnO = 40 gr. 5), dégage.....	43.200
La combinaison de cet oxyde de zinc avec un équivalent d'acide sulfurique (SO <sup>4</sup> H = 49 gr.) dégage.....	11.700
Total dégage....	54.900
La décomposition d'un équivalent d'eau (HO = 9 gr.) absorbe.....	34.500
Différence ou quantité de chaleur dégagee....	20.400

Ces 20.400 calories-gramme représentent l'énergie calorifique développée par la réaction chimique dont il s'agit. Or, d'après les expériences de Joule et Clausius pour déterminer l'équivalent mécanique de la chaleur, la calorie-gramme équivaut à un travail mécanique de 41.700.000 ergs ou, ce qui revient au même, de 4,17 joules. Par conséquent les 20.400 calories dégagés dans la réaction chimique précédente équivalent à une énergie mécanique ou électrique de 85.068 joules. C'est cette énergie disponible qui peut constituer la source d'électricité nécessaire pour la création d'un courant.

La première pile construite par Volta, en l'année 1800, a reçu le nom de *pile à colonne* ; elle résulte de la superposition verticale d'un certain nombre d'éléments de pile

(1) La *petite calorie* ou *calorie-gramme*, est la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré la température d'un gramme d'eau.



cuivre-zinc-drap mouillé. Commençons par une rondelle de cuivre en la plaçant sur un socle isolant et soit  $V$  son potentiel ; la rondelle de zinc que nous lui superposons avec contact direct prend un potentiel plus élevé  $V + a$  ; la rondelle mouillée qui vient ensuite et la nouvelle rondelle de cuivre qui la surmonte se comportent comme de simples conducteurs sans créer aucune force électromotrice, en sorte que cette seconde rondelle de cuivre est portée au même potentiel  $V + a$  que la première rondelle de zinc ; si donc nous ajoutons une nouvelle rondelle de zinc, elle prendra le potentiel  $V + 2a$  qui se transmettra intégralement à la seconde rondelle de drap mouillé. Ajoutons un troisième système cuivre-zinc-drap mouillé, nous obtiendrons sur sa rondelle humide le potentiel  $V + 3a$ . L'addition d'un quatrième élément de pile donnera naissance au potentiel  $V + 4a$ , et ainsi de suite. En désignant par  $n$  le nombre des piles élémentaires que nous ferons entrer dans la construction de la pile à colonne (1), nous aurons à la base de cette pile le potentiel  $V$  et à son sommet le potentiel  $V + na$ . La différence  $na$  de ces deux potentiels extrêmes constitue la force électromotrice de notre pile à colonne. Cette pile a malheureusement l'inconvénient de s'affaiblir très vite, alors même que l'on prend soin de maintenir humides les rondelles de drap ; elle n'a pas d'usage pratique et n'offre qu'un intérêt historique, d'ailleurs très grand.

Volta a réalisé une amélioration considérable en remplaçant sa pile à colonnes par une *pile à tasses* (fig. 7), dans laquelle chaque vase rempli d'eau acidulée reçoit une lame de cuivre et une lame de zinc, cette dernière étant munie d'un fil de cuivre destiné à la faire communiquer avec la lame de cuivre de la tasse suivante. Chaque élément

(1) Il est d'usage de supprimer la dernière rondelle de drap mouillé qui se trouverait ainsi placée en haut de la pile ; cette pile se termine ainsi par une rondelle de zinc.

composé d'un vase, d'une lame de cuivre et d'une lame de zinc munie de son fil de cuivre constitue ce que l'on appelle un *couple* voltaïque. On donne ordinairement au système de couples une disposition circulaire, ce qui a motivé le

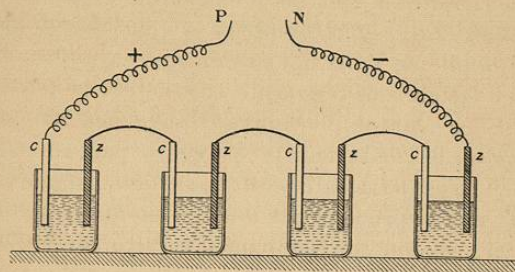


Fig. 7.

nom de *pile à couronne de tasses*. La lame de cuivre de la première tasse et la lame de zinc de la dernière, qui ne communiquent avec aucune autre lame, sont destinées à recevoir les attaches du conducteur qui doit fermer le circuit de la pile.

La force électromotrice d'un couple Volta diffère peu d'un volt à circuit ouvert ; mais elle s'affaiblit vite en circuit fermé, à cause de la production du phénomène de la *polarisation* que nous étudierons plus loin. Comme le zinc du commerce, zinc contenant souvent des impuretés, est attaqué par l'eau acidulée aussi longtemps qu'il y reste plongé, la lame de zinc d'un couple Volta se consume sans effet utile à circuit ouvert ; c'est là un inconvénient grave auquel on peut heureusement remédier en remplaçant le zinc du commerce par le zinc amalgamé, qui n'est attaqué qu'à circuit fermé.

18. *Propagation de l'électricité.* — Avant de continuer



l'étude des piles électriques et de décrire les divers systèmes employés aujourd'hui, il est indispensable de nous occuper du phénomène de la propagation de l'électricité dans un fil conducteur. Ainsi que nous l'avons établi au début de ce chapitre, la création d'un courant exige la mise en œuvre d'une *force électromotrice* et d'une *source d'électricité* ; la pile de Volta nous ayant mis en possession de ces deux facteurs de *l'énergie électrique*, la possibilité d'obtenir des courants continus se trouve bien établie.

Lorsqu'un fil conducteur est parcouru par un courant, l'électricité n'est pas localisée sur sa surface, comme à l'état statique ; elle se propage par tous les points de sa section droite, en sorte que son écoulement paraît analogue à celui de l'eau dans un tuyau de conduite ; de même que, dans l'écoulement liquide, le débit correspondant à une différence de niveau donnée, dépend de la résistance que le tuyau de conduite oppose au passage de l'eau, de même, dans le courant électrique, le débit correspondant à une force électromotrice donnée dépend de la *résistance du fil conducteur* au passage de l'électricité. Il est clair que le débit doit augmenter ou diminuer quand la résistance diminue ou augmente, en sorte que l'on peut définir la résistance en disant qu'elle est, toutes choses égales d'ailleurs, inversement proportionnelle au débit. A résistance égale du tuyau de conduite, le débit de liquide est proportionnel à la hauteur de chute (ou différence de niveau entre les deux extrémités du tube) ; de même, à résistance égale du fil conducteur, le débit d'électricité est proportionnel à la force électromotrice (ou différence de potentiel entre les deux extrémités du conducteur). En combinant cette observation avec la définition précédente de la résistance, nous arrivons à ce théorème :

LOI D'OHM. — *L'intensité du courant dans un fil conducteur est proportionnelle à la force électromotrice*

*et inversement proportionnelle à la résistance de ce fil.*

Nous venons d'arriver à cette loi d'une manière intuitive, en admettant l'hypothèse d'une véritable analogie entre l'écoulement de l'eau dans un tuyau et la propagation de l'électricité dans un fil conducteur. Il est clair qu'une telle méthode manque absolument de rigueur et que son seul avantage est de rendre facilement compréhensible la célèbre loi à laquelle on a donné le nom du physicien Ohm, d'Erlangen, auquel sa découverte est due. Ohm a établi cette loi par des considérations théoriques qu'il a publiées en 1827 dans son traité de la *Théorie mathématique de la pile galvanique* ; ce savant a assimilé la propagation de l'électricité à celle de la chaleur ; il existerait en chaque point d'un conducteur électrique une *tension*, analogue à la *température*, en vertu de laquelle une molécule transmettrait à une molécule très voisine possédant une tension moindre que la sienne, une quantité d'électricité proportionnelle à la différence des tensions et dépendant aussi de la distance des deux molécules ; en partant de ce postulat on peut appliquer à l'étude de la propagation de l'électricité la méthode de raisonnement que l'immortel Fourier a employée dans sa *Théorie de la chaleur*. Ajoutons qu'en 1835 Pouillet a retrouvé par la méthode expérimentale les résultats auxquels Ohm était arrivé par la théorie. Nous devons, par conséquent, regarder la loi d'Ohm comme absolument démontrée.

Sur les trois quantités *force électromotrice*, *intensité* ou *débit* du courant et *résistance* du conducteur qui interviennent dans cette loi, nous connaissons déjà la nature de la première, ainsi que son unité pratique appelé *volt*. Il nous reste à définir les deux autres. Le *débit* ou *intensité* du courant n'est autre chose que la quantité d'électricité positive qui traverse par seconde une section droite quel-



conque du conducteur ; l'unité pratique d'intensité est celle qui correspond au débit d'un coulomb par seconde, elle a reçu le nom d'*ampère*. Quant à la résistance, on peut la définir, d'après la loi d'Ohm, par le rapport de l'intensité à la force électromotrice ; l'unité de résistance, appelée *ohm*, est la résistance d'un conducteur pour lequel l'intensité d'un ampère correspondrait à la force électromotrice d'un volt. Avec ce choix d'unités, la loi d'Ohm s'énonce dans les termes suivants :

*L'intensité du courant exprimé en ampères est égale au quotient de la force électromotrice exprimée en volts par la résistance du conducteur exprimée en ohms.*

La formule correspondante est

$$I = \frac{E}{R}$$

Les expériences de Davy et de C. Becquerel ont montré que

*La résistance d'un fil conducteur homogène est proportionnelle à sa longueur et inversement proportionnelle à sa section.*

On a, par conséquent, en désignant par  $l$  et  $\omega$  la longueur et la section du fil et par  $r$  sa résistance, la formule très simple

$$r = \frac{1}{c} \frac{l}{\omega},$$

dans laquelle le paramètre  $\frac{1}{c}$ , auquel on donne le nom de *résistance spécifique*, est égal à la résistance d'un conducteur pour lequel on aurait  $l = 1$  et  $\omega = 1$ , dimensions correspondant au cube construit sur l'unité de longueur. L'inverse  $c$  de la résistance, spécifique, a reçu le nom de *coefficient de conductibilité*, parce que sa valeur qui ne

dépend que de la substance du conducteur, caractérise le pouvoir conducteur de cette substance pour l'électricité voltaïque. Les métaux sont, en général, bons conducteurs ; voici la liste des métaux les plus usuels, classés dans le sens du décroissement de la conductibilité : argent, cuivre, or, zinc, étain, fer, plomb, platine, mercure ; l'élévation de leur température a pour effet de diminuer leur pouvoir conducteur.

*L'ohm légal, unité pratique de résistance électrique, est la résistance d'une colonne de mercure ayant, à la température de la glace fondante, une longueur de 106 centimètres et une section droite de 1 millimètre carré. C'est là l'étalon de résistance.*

On peut obtenir sensiblement cette résistance d'un ohm soit avec un fil de cuivre rouge de 50 mètres de longueur et de 1 millimètre carré de section, soit avec un fil télégraphique en fer galvanisé de 100 mètres de longueur et de 4 millimètres de diamètre.

Il résulte de la loi d'Ohm que *le long d'un fil conducteur homogène à section constante le potentiel décroît*

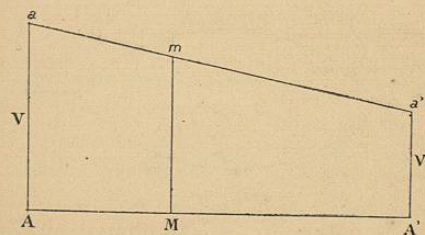


Fig. 8.

*proportionnellement à la longueur.* Soit AA' le fil conducteur (Fig. 8), Aa et A'a' deux ordonnées représentant respectivement les valeurs V et V' du potentiel aux deux extrémités ; la valeur du potentiel au point intermédiaire



quelconque M sera représentée par l'ordonnée  $Mm$ , dont l'extrémité  $m$  est située sur la droite  $a a'$ . Si le potentiel  $V$  correspondant à l'extrémité  $A'$  était négatif, son ordonnée se placerait au-dessous de la droite  $AA'$  (Fig. 9) ; il y

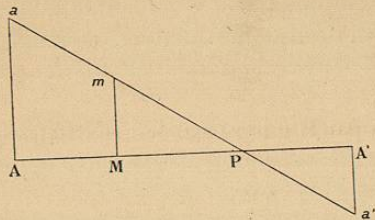


Fig. 9.

aurait alors sur le conducteur un point intermédiaire P à potentiel nul.

19. *Circuits multiples.* — Supposons que le fil conducteur se bifurque entre deux points A et B (Fig. 10). Soit I

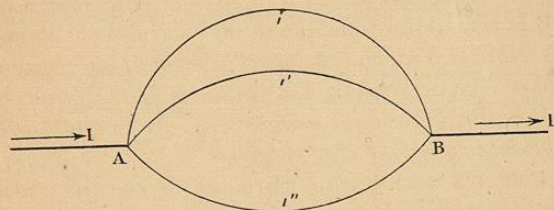


Fig. 10.

l'intensité du courant avant le point A et après le point B ; cette intensité totale se subdivise en parties  $i, i', i''$  correspondant aux conducteurs intermédiaires, et l'on a

$$I = i + i' + i''$$

Désignons, d'autre part, par  $V_1$  et  $V_2$  les potentiels en

A et en B et par  $r, r', r''$  les résistances des fils conducteurs compris entre ces deux points ; nous aurons

$$V_1 - V_2 = ri = r'i' = r''i''$$

ou, sous une autre forme,

$$V_1 - V_2 = \frac{i}{r} = \frac{i'}{r'} = \frac{i''}{r''} = \frac{i + i' + i''}{\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} + \frac{1}{r''}}$$

Désignons par R une résistance auxiliaire satisfaisant à la relation

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} + \frac{1}{r''} ;$$

les formules précédentes nous donneront

$$V_1 - V_2 = \frac{I}{\frac{1}{R}} = RI.$$

Nous pourrions, par conséquent, regarder R comme la résistance d'un conducteur unique qui remplacerait entre A et B le circuit multiple donné. Si l'on convient d'appeler *conductibilité* d'un conducteur l'inverse de sa résistance, on arrive à ce théorème : *La conductibilité totale d'un circuit multiple est égale à la somme des conductibilités des conducteurs dont il se compose.*

Si tous les conducteurs formant le circuit multiple avaient la même résistance, il suffirait de diviser cette résistance commune par le nombre de ces conducteurs pour obtenir la résistance du circuit.

20. *Lois de Kirchhoff.* — On donne le nom de *lois de Kirchhoff* à deux théorèmes qui permettent de résoudre les problèmes de la distribution des courants dans des conducteurs linéaires complexes.



Le premier de ces théorèmes est d'une telle évidence qu'il est vraiment singulier de lui attribuer un auteur. Il exprime tout simplement *qu'en un point commun à plusieurs conducteurs la quantité d'électricité qui arrive par seconde est égale à celle qui part*. Il est clair, en effet, qu'il ne peut pas se produire en ce point une accumulation d'électricité qui croîtrait avec le temps. Nous avons implicitement admis cette vérité au numéro précédent, en remarquant que l'intensité du courant qui arrive en A est égale à celle du courant qui sort en B. Pour permettre à cette vérité de revendiquer le titre honorifique de *loi* ou de *théorème*, on l'énonce moins clairement, mais plus savamment, de la manière suivante : *Si plusieurs conducteurs aboutissent au même point, la somme algébrique des intensités des courants sur chacun d'eux, comptées à partir de ce point, est identiquement nulle*.

Le second théorème de Kirchhoff est plus sérieux ; en voici l'énoncé : *Si plusieurs conducteurs forment un conducteur fermé, la somme algébrique des produits obtenus en multipliant la résistance de chacun de ces conducteurs par l'intensité du courant qui le traverse est égale à la somme algébrique des forces électromotrices existant sur le périmètre du polygone*.

Soit ABCDE (Fig. 11) le conducteur dont il s'agit. Supposons qu'il soit parcouru par un mobile dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre, et convenons d'affecter du signe + ou du signe - l'intensité du courant qui passe dans un côté quelconque, suivant que ce courant se dirige dans le sens du mouvement du mobile ou dans le sens opposé ; à chacun de ces côtés correspond une intensité de courant  $i$ , une résistance  $r$  et une force électromotrice  $E$  qui se produit sur lui-même (soit, par exemple, par suite de la soudure de deux métaux différents). Les sommets successifs A, B, C, D, E, sont d'ail-

leurs respectivement portés aux potentiels  $V_1, V_2, V_3, V_4,$

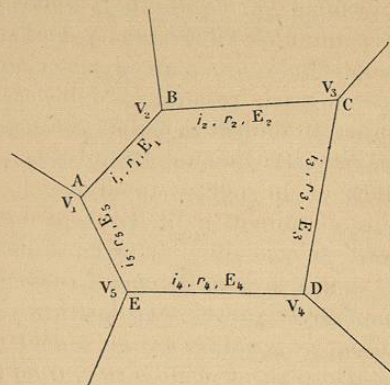


Fig. 11.

$V_5$ , qu'il est inutile de supposer connus. Cela posé, nous aurons, d'après la loi d'Ohm, les égalités :

$$\begin{aligned} V_1 - V_2 + E_1 &= i_1 r_1 \\ V_2 - V_3 + E_2 &= i_2 r_2 \\ V_3 - V_4 + E_3 &= i_3 r_3 \\ V_4 - V_5 + E_4 &= i_4 r_4 \\ V_5 - V_1 + E_5 &= i_5 r_5 \end{aligned}$$

Ajoutons membre à membre toutes ces égalités ; les potentiels  $V$  disparaissent du total et nous trouvons :  
 $E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 = i_1 r_1 + i_2 r_2 + i_3 r_3 + i_4 r_4 + i_5 r_5$   
 formule qu'il suffit d'énoncer en langage ordinaire pour obtenir la loi de Kirchhoff.

**21. Loi de Joule.** — Nous avons vu en électrostatique, que l'énergie électrique peut être regardée comme une transformation du travail mécanique et par conséquent s'exprimer en unités *joule*. Cette unité pratique est environ



la dixième partie de l'unité *kilogrammètre*, souvent adoptée en mécanique, qui représente le travail nécessaire pour élever le poids d'un kilogramme à la hauteur d'un mètre. On appelle *puissance* d'un moteur la quantité de travail qu'il produit par seconde. S'agit-il par exemple d'une chute d'eau, on obtient sa puissance en multipliant sa hauteur par le poids de son débit; avec 1 mètre de hauteur de chute et un débit de 75 litres d'eau, pesant 75 kilogrammes, on obtient un travail de 75 kilogrammètres par seconde; la puissance de cette chute est celle à laquelle on a donné le nom de *cheval-vapeur*. La puissance du courant électrique dans un conducteur est représentée par le nombre de *joules* qui est produit par seconde; ce nombre de joules est d'ailleurs égal au produit du nombre de volts que contient la force électromotrice par le nombre des coulombs débités par seconde; or, nous avons adopté comme unité d'intensité du courant l'*ampère*, qui correspond au débit d'un coulomb par seconde; par conséquent : *La puissance d'un courant électrique est égale au produit de sa force électromotrice exprimée en volts par son intensité exprimée en ampères*. Cette définition nous conduit à adopter comme unité de puissance, le produit d'un volt par un ampère, c'est-à-dire *la puissance d'un courant ayant une force électrique d'un volt et l'intensité d'un ampère*; on a donné le nom de *watt* à cette unité de puissance (1).

En définitive, la puissance électrique  $W$  d'un courant dont la force électromotrice et l'intensité sont respectivement  $E$  et  $I$  est donnée par la formule

$$W = EI ;$$

Si nous désignons, en outre, par  $R$  la résistance du con-

(1) Il est utile d'indiquer ici que le cheval-vapeur vaut 736 watts

ducteur, exprimée en ohms, nous aurons d'après la loi d'Ohm

$$E = RI ;$$

de ces deux formules on déduit aisément

$$W = RI^2 ;$$

par conséquent : *La puissance électrique d'un courant, exprimée en watts est égale au produit du carré de son intensité, exprimée en ampères, par la résistance du conducteur, exprimée en ohms*.

L'*énergie électrique* de ce courant, qui ne produit aucun travail extérieur, ne peut se transformer qu'en *énergie calorifique*; on constate, en effet, que le conducteur s'échauffe et dégage de la chaleur.

Joule et Clausius ont déterminé, au moyen d'expériences variées, la corrélation qui existe entre le travail mécanique et la chaleur. Ils ont trouvé que la *calorie*, quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré centigrade la température d'un kilogramme d'eau, équivaut à un travail de 425 kilogrammètres, soit 4170 joules. Il en résulte, que la *petite calorie* ou *calorie-gramme*, mille fois plus petite que la calorie précédente, satisfait à l'égalité

$$\text{calorie-gramme} = 4,17 \text{ joules.}$$

Ce nombre

$$J = 4,17$$

est souvent appelé *l'équivalent mécanique de la chaleur*.

Si nous désignons par  $Q$  la quantité de chaleur, exprimée en calories-gramme, que dégage par seconde le conducteur du courant dont la puissance électrique, (*énergie électrique* ou *travail mécanique* par seconde), est  $W$ , nous aurons

$$W = JQ,$$



et, par conséquent, en nous reportant à une des formules précédentes,

$$JQ = RI^2.$$

De là ce théorème :

LOI DE JOULE. — *L'énergie calorifique dégagée sur un conducteur pendant l'unité de temps est égale au produit du carré de l'intensité du courant par la résistance du conducteur.*

Cette loi remarquable résulte à la fois de la loi d'Ohm et du grand principe de la conservation de l'énergie.

22. *Résistance intérieure d'une pile.* — Dans ce qui précède, nous avons considéré isolément un fil conducteur en supposant qu'il desserve une source d'électricité et qu'une différence de potentiel ou force électromotrice soit créée entre ses deux extrémités. Nous avons, en un mot, fait abstraction par la pensée, dans un intérêt théorique, de la pile aux deux pôles de laquelle doit être attaché le fil conducteur. Examinons maintenant le système complet formé par la pile et le conducteur au moyen duquel se fait la fermeture du circuit (Fig. 12). Le courant qui va extérieurement du cuivre au zinc est complété par un courant, intérieur à la pile, qui va du zinc au cuivre. La pile remplit, par conséquent, ce triple rôle

de produire l'énergie électrique,  
de créer la force électromotrice,  
et de constituer une partie du circuit fermé.

Considérée comme conducteur du courant, notre pile électrique (que nous supposons ici composée seulement d'un élément Volta) présente une résistance déterminée, dont nous avons à tenir compte.

Désignons par  $R$  la résistance du circuit extérieur et par

$r$  la résistance intérieure de la pile ; la résistance du circuit total sera  $R + r$  et la loi d'Ohm nous donnera

$$E = (R + r) I,$$

formule dans laquelle  $E$  est la force électromotrice de la pile et  $I$  l'intensité du courant obtenu.

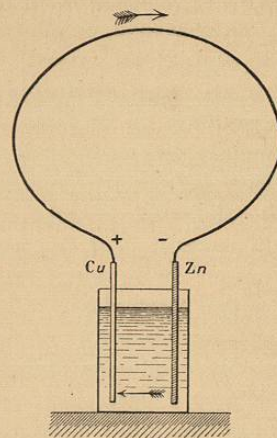


Fig. 12.

La puissance mécanique de la pile, c'est-à-dire la quantité d'énergie qu'elle développe par seconde, a pour valeur

$$W = EI = (R + r) I^2$$

Il est à remarquer que la résistance intérieure  $r$  va en augmentant avec la durée du fonctionnement de la pile. En voici la cause. Au début, le liquide de l'élément Volta est l'eau acidulée d'acide sulfurique, mais il subit ensuite la transformation continue de son acide en sulfate de zinc soluble, de là, une diminution de son pouvoir conducteur.