

L'ÉLECTRICITÉ

A LA PORTÉE

DE TOUT LE MONDE

Par **Georges CLAUDE**

INGÉNIEUR, CHEF DU SERVICE DE VÉRIFICATION DES INSTALLATIONS

A LA C^{ie} THOMSON-HOUSTON

COURANT CONTINU, COURANTS VARIABLES
COURANTS ALTERNATIFS SIMPLES ET POLYPHASES.

NOTRE BUT

Qu'est-ce que l'électricité ?

Si tous ceux auxquels la fée bienfaitrice de notre époque a eu l'occasion de rendre service s'avisait quelque jour de le demander à ceux qui le savent — ou qui croient le savoir — ce ne serait certes pas une petite opération que de les satisfaire !

Télégraphie et téléphonie, par le temps qui court, n'en sont plus à compter leurs adeptes. Eclairage et traction électriques n'en ont pas beaucoup moins. Et quant aux sonneries électriques, aux bobines de Ruhmkorff, quel collégien en rupture de *bancs* n'en a approfondi les mystères, n'a inquiété son entourage en utilisant de façon malicieuse leurs multiples ressources !

Qu'est-ce que cela, cependant, à côté de ce que nous réserve l'avenir ? Le jour n'est-il pas proche où nos chevaux de fiacre auront définitivement *relayé* ; où la vapeur, devenue trop paresseuse, aura disparu des locomotives de nos chemins de fer ; où, sous la poussée de l'électrochimie, les méthodes de la grande industrie chimique, si laborieusement édifiées, auront été submergées ? Ne touchons-nous pas au moment où nous ne pourrions plus voir tourner une machine ou nous faire arracher une dent, labourer nos champs ou nous chauffer les pieds que par la grâce de l'électricité !

Ce jour-là, ce sera l'espèce humaine tout entière qui pourra se poser la question inscrite en tête de ces lignes :

Qu'est-ce que l'électricité ?

En attendant cet heureux temps, c'est, si vous le permettez, ce que nous allons essayer de tirer au clair pour notre compte.

Cependant, avant tout, il convient... d'éclairer notre lanterne.

Si nettement posée qu'elle soit en apparence, la question

qui nous sert de point de départ est, en effet, susceptible de réponses bien distinctes suivant le point de vue auquel on se place. Le savant, dont la seule ambition est d'arracher à la Nature quelques-uns de ses secrets, ne l'envisage pas de la même façon que le fabricant de sonnettes électriques, qui veut avant tout tirer de l'électricité tout ce qu'elle peut rendre, commercialement parlant, qui veut placer dans son année le plus possible d'éléments de pile et de mètres de fils.

Que notre savant cherche le secret de l'électricité dans les frémissements des molécules de l'*éther*; que ses études lui montrent, chaque jour plus certaine, l'identité de la chaleur, de la lumière et de l'électricité; qu'il tire de tous ces faits les déductions les plus profondes sur la constitution de l'Univers, rien de mieux: C'est l'honneur de notre humanité que de tels hommes existent et mènent à bien des problèmes si ardens.

Et pourtant, il faut le reconnaître, voilà qui *indiffère* joliment à notre marchand de sonnettes!

Ce qui le préoccupe, cet honorable industriel, ce que veulent en somme tous ceux qui pour une raison ou pour une autre ont affaire au côté pratique de l'électricité, ce n'est pas en apprendre *la nature*, ce n'est pas en connaître le *pourquoi*, c'est tout bonnement se rendre un compte suffisamment exact *des effets* qu'elle produit.

Et dame, il faut que les mathématiciens en fassent leur deuil, mais le calcul intégral ni la géométrie analytique n'ont rien à voir en cette histoire!

Satisfaire à ce désir fort légitime, dans la mesure de nos moyens, tel est le but que nous nous efforcerons d'atteindre.

Ainsi, répétons-le, il n'entre pas dans nos vues — sans compter que ce serait faire montre d'une prétention fort au-dessus de notre compétence — de traiter la question de haut: nous laissons à de plus dignes d'initier les profanes à de si difficiles problèmes, de leur découvrir des voiles que la Science elle-même n'a pas encore complètement soulevés. Pour nous, nous nous estimerons fort heureux si, après avoir eu le courage méritoire de suivre jusqu'au bout nos raisonnements terre-à-terre, le débutant peut se dire avec conviction en refermant son livre:

— Pas amusant, mais bonne besogne!

COURANT CONTINU

CHAPITRE PREMIER

PREMIÈRES CONSTATATIONS

PILES ÉLECTRIQUES. DIFFÉRENCE DE POTENTIEL

En s'engageant dans le domaine de l'électricité, le débutant s'attend sans aucun doute à se trouver sur un terrain inconnu, d'une consistance toute spéciale, et sur lequel il ne tardera pas à se trouver dépaycé: on a réalisé tant de merveilles avec cette électricité et chacune d'elles met en jeu des phénomènes si bizarres, si mystérieux, si éloignés de ceux que nous rencontrons dans la vie courante !

Disons-le lui tout de suite, à ce timoré, ses craintes sont exagérées.

Assurément, j'aurais mauvaise grâce à nier que, parfois, des horizons inattendus s'ouvriront à ses yeux. L'électricité ne serait plus l'électricité s'il n'en était ainsi. Mais je tiens à lui affirmer que les points de repère ne lui feront pas défaut si souvent qu'il le pense : les phénomènes électriques ne sont pas aussi différents des autres qu'ils le paraissent à première vue; il nous est possible de trouver dans certaines considérations tout à fait terre-à-terre, dans certains phénomènes tout à fait familiers à chacun des guides sûrs pour diriger nos premiers pas. Nous ne manquerons pas d'utiliser de si précieux auxiliaires.

C'est ainsi que, bien souvent, les phénomènes électriques présentent une grande *analogie* avec certains phénomènes hydrauliques, comme ceux qui accompagnent l'écoulement

des liquides. Et comme il est plus facile de raisonner sur des phénomènes comme ceux-ci, parce qu'ils sont tangibles, aisés à représenter, et que d'ailleurs ils nous sont familiers, leur observation attentive peut faciliter grandement l'étude plus délicate de l'électricité.

Mais nous ne saurions trop insister sur ce point, qu'*analogie* ne signifie pas *identité*, et que s'il existe entre les deux ordres de phénomènes quelques ressemblances superficielles, suffisantes pour *faire voir*, cette analogie ne nous enseigne *rien* sur le mécanisme intime du phénomène.

Cela, c'est la partie de la tâche que nous avons déclinée.

Ceci posé — et sans nous embarrasser d'un historique que le lecteur trouvera en détail dans le premier traité de physique venu, nous entrerons en matière.

L'électricité étant une science expérimentale par excellence, il nous faut avant tout nous procurer quelques instruments.

Pas de matériel compliqué, d'ailleurs. Chaque fois que cela nous sera possible, nous nous souviendrons que l'illustre Scheele ne dédaignait pas — et pour cause — de faire collaborer à ses premières découvertes tuyaux de pipes et tessons de bouteilles, qu'il éprouvait un plaisir particulier à trouver, pour ses expériences les plus délicates, des ressources toujours nouvelles dans le matériel de sa... batterie de cuisine.

Nous inspirant de ce noble exemple, sans prétendre lui faire, sur le terrain des découvertes, une concurrence qui serait malaisée, un vase de verre ou de faïence d'un litre environ, un vulgaire pot à confiture, sera, pour nos débuts, la pièce la plus compliquée de notre attirail.

Nous le remplirons aux $\frac{2}{3}$ avec de l'eau, à laquelle nous ajouterons un dixième environ d'acide sulfurique, ce liquide qui s'est taillé dans tant de figures humaines, sous le nom d'*huile de vitriol*, une si détestable réputation. C'est dire que si nous tenons à notre... physique, la prudence est ici de rigueur — mais non l'habit de cérémonie : pour éviter des projections de liquide dangereuses pour notre figure et mortelles pour nos vêtements, nous ajouterons l'acide dans l'eau en un *mince filet* et en agitant constamment.

Disons encore, avant d'aller plus loin, que si votre épicier ne connaît pas l'huile de vitriol, du vinaigre très fort, employé seul, pourra à la rigueur la remplacer.

Notre petite cuisine terminée, plongeons dans le liquide (fig. 1) un système de deux lames métalliques rectangulaires, l'une en zinc, l'autre en cuivre, séparées par un morceau de drap et attachées ensemble avec de la ficelle. A chacune des lames, nous avons soudé un fil de cuivre ou de laiton ; pour éviter de renverser notre vase lorsque dans le feu des essais nous tirerons sur les fils, nous avons tirebouchonné consciencieusement chacun de ces fils, *f*, *f'*, en l'enroulant autour d'un crayon : par la même occasion notre appareil s'est trouvé doté d'un petit air scientifique très flatteur pour notre amour-propre. Attention surtout à ce que les deux fils, non plus que

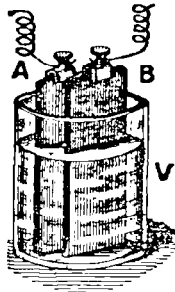


Fig. 1. — Pile électrique.

nos deux plaques, ne se touchent en aucun point...

Première constatation : nous voyons se former à la surface de la lame de zinc une foule de petites bulles de gaz qui bientôt viennent crever à la surface : c'est que le liquide exerce sur le zinc une *action chimique* énergique. Vous savez sans doute que l'eau est un composé, une combinaison de deux gaz, l'hydrogène et l'oxygène. Un chimiste vous dirait que le zinc, sous l'influence de l'acide sulfurique, enlève à l'eau son oxygène et disparaît progressivement dans le liquide sous forme de sulfate de zinc, tandis que les petites bulles de gaz représentent l'hydrogène issu de la décomposition de l'eau.

Mais renvoyons ce chimiste à ses cornues. C'est à l'électricité que nous avons affaire, et vous allez voir que c'est suffisant.

Nos deux plaques métalliques, en effet, sont maintenant dans un état bien particulier et bien curieux.

Placez sur la langue, à quelques millimètres l'une de l'autre, les extrémités de nos deux fils en tire-bouchon : vous ne sentez rien ? Effectivement, notre système est un peu faible pour cette expérience, mais si nous l'avions remplacé par un système un peu plus fort, constitué par trois ou quatre paires de plaques immergées dans le liquide acide de vases différents et reliées entre elles par des fils de cuivre, comme l'indique la figure 2, vous auriez senti immédiatement un *picotement bizarre*, qui vous aurait fait saliver, qui vous aurait fait aussi trembler le bout de la langue.

Ce n'est pas le métal des fils qui présente cette singulière saveur acide : la preuve, c'est qu'elle disparaît dès que vous enlevez *un seul* d'entre eux, pour reparaitre dès que vous

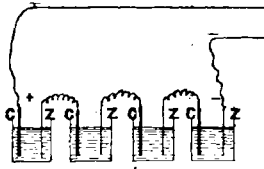


Fig. 2. — Assemblage de piles.

touchez de nouveau la langue avec ce second fil ; la preuve encore, c'est que cette saveur disparaît aussi lorsque, conservant toujours les deux fils au contact de la langue, vous les faites en outre toucher l'un à l'autre.

C'est là, en effet, un *phénomène électrique*.

Passons à un autre exercice.

Reprenons notre système de deux plaques plongeant dans un vase unique qui, cette fois, sera suffisant, et emportons-le dans une pièce obscure, dans une cave : nous allons approcher, puis écarter l'un de l'autre nos deux fils, et au moment de la séparation, vous pourrez voir jaillir au point de contact une *étincelle*. N'ayez crainte, d'ailleurs, d'être aveuglé ! Il vous faut même y regarder à deux fois avant de distinguer quelque chose. Et savez-vous pourtant ce que c'est, cette chétive étincelle ? C'est la foudre en miniature, c'est aussi

l'arc électrique que vous admirez sur les boulevards de nos grandes villes, c'est, en un mot, l'*étincelle électrique*!

Maintenant, je vous demande un peu d'attention :

Notre chimiste nous a confié tout à l'heure que le liquide acide baignant nos deux plaques exerçait sur le zinc une *action chimique*. Ne serait-ce pas justement cette action chimique qui provoque les phénomènes électriques que nous venons de constater? Oui, sans doute, car si à la place du liquide acide, j'avais pris de l'eau *pure*, ces effets singuliers ne se seraient pas produits.

Et pourtant, liquide corrosif et action chimique ne sont pas suffisants, car si nous plongeons dans un liquide même très fortement acide deux lames métalliques *identiques*, deux lames de zinc par exemple, ces deux lames sont énergiquement attaquées : cependant plus la moindre action sur la langue, plus la moindre étincelle !

Cela ne vous dit-il rien ?

Si, n'est-ce pas? Le liquide corrosif vous paraît nécessaire, mais la présence de deux lames métalliques *différentes* vous semble une condition non moins indispensable: Vous êtes donc amené à conclure que c'était la *différence des actions chimiques* sur nos deux plaques de tout à l'heure (celle de cuivre était très peu attaquée) qui joue le grand rôle. C'est cela même, en effet, et c'est cette différence d'actions chimiques qui a mis les deux plaques dans des *états électriques* nécessairement *différents* eux aussi, puisque le contact d'un des fils avec notre langue n'a pas produit le même résultat que le contact simultané des deux.

Ceci posé, vous ne ferez aucune difficulté pour reconnaître que, sans sortir du domaine des faits, sans forger aucune hypothèse, nous pouvons affirmer qu'il s'est développé dans notre système *quelque chose* de spécial. Ce quelque chose dont notre langue, dont nos yeux nous démontrent l'existence, nous avons aussi incontestablement le droit de lui donner un nom : Nous l'appellerons, si vous n'y voyez pas d'inconvénient, une *différence de potentiel*.

Ce sera le premier terme de notre vocabulaire.

Pour l'enrichir dès à présent, ce pauvre vocabulaire, ajou-

tons que l'appareil bien simple qui nous a permis de faire ces importantes constatations est une *pile électrique* ; et pourquoi une *pile* ? Parce que le physicien italien Volta, qui construisit, en 1802, le premier de ces appareils, *empila* les uns sur les autres des disques de cuivre et des disques de zinc en les séparant deux par deux par des rondelles de drap imbibées d'acide sulfurique étendu. Il obtint ainsi une *pile* au sens absolu du mot, et ses successeurs, jugeant avec raison inutile d'aller chercher midi à quatorze heures, continuèrent d'appeler piles les appareils généralement quelconques dans lesquels *l'action chimique* est mise à profit pour produire l'électricité.

Quant aux deux plaques métalliques plongeant dans le liquide, nous les appellerons des *électrodes*.

Tout cela, évidemment, ne nous mène pas bien loin : aussi allons-nous nous hâter de voir à l'œuvre notre différence de potentiel.

COURANT ÉLECTRIQUE

Jusqu'ici, nous n'avons fait que constater : il s'agirait, maintenant, de comprendre. Le moment est donc venu de

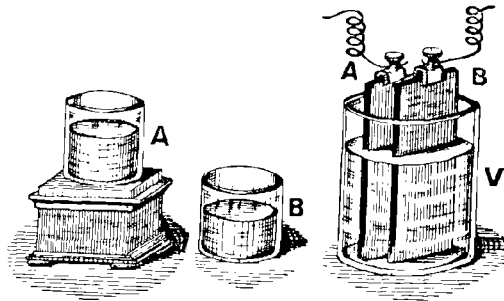


Fig. 3.

Fig. 4.

Fig. 3 et 4. — Les deux vases A et B ne sont pas au même niveau hydraulique. Les deux électrodes A et B de la pile ne sont pas au même potentiel électrique.

faire un premier appel à ces comparaisons hydrauliques dont nous avons tout à l'heure vanté les mérites.

Nous allons supposer que deux vases contenant de l'eau, A et B, sont placés à des hauteurs différentes, A, par exemple, plus haut que B (fig. 3). Nous exprimerons cela en disant qu'entre A et B il existe une certaine *différence de niveau*.

Or, rappelez-vous que tout à l'heure nous avons désigné ce quelque chose de spécial créé par l'action chimique dans la pile sous le nom de *différence de potentiel*. Différence de niveau, différence de potentiel : vous vous doutez bien que cette similitude de noms cache une ressemblance quelconque et que nous n'avons pas ainsi baptisé notre... quelque chose pour le plaisir de créer un nom baroque.

Effectivement, ce fameux quelque chose a comme effet de placer au point de vue électrique les deux électrodes de notre pile (fig. 4) dans les mêmes conditions relatives que nos deux vases A et B. En d'autres termes, les deux électrodes d'une pile en activité *ne sont pas au même niveau électrique* ou, comme disent les électriciens, au même *potentiel*. Cela revient à dire qu'il existe entre elles une certaine différence de niveau électrique, une certaine *différence de potentiel*, et vous voyez ainsi la genèse toute simple de cette expression que vous jugiez tout-à-l'heure passablement étrange.

Relions maintenant nos deux vases A et B par un tuyau ouvert, T (fig. 5). Vous savez que la différence de niveau qui

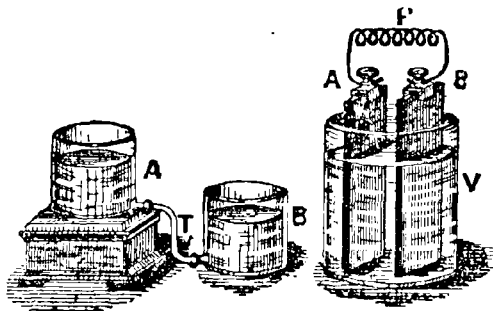


Fig. 5.

Fig. 6.

Fig. 5 et 6.—Relions les deux vases A et B par un tuyau T ; sous l'effet de la différence de niveau, un *courant liquide* se produit dans T.

Relions les deux électrodes A et B par un fil conducteur *f*. Sous l'effet de la différence de potentiel, un *courant électrique* se produit dans le fil.

existe entre eux va provoquer un *courant liquide* qui ira du vase où le niveau est le plus élevé à celui où il est le plus bas.

Or, ce que nous venons de réaliser avec les liquides, nous pouvons le réaliser d'une façon analogue avec l'électricité.

Reprenons un des fils métalliques terminaux de la figure 4 : la pratique démontre — nous pouvions déjà le soupçonner

après nos expériences de tout-à-l'heure — que ce fil est à l'électricité ce qu'un tuyau est aux liquides, et on l'appelle pour cette raison un *conducteur électrique* (1). Avec ce conducteur, touchons, relierons les deux *pôles*, les deux électrodes de notre pile (fig. 6). Puisque, d'après ce que nous avons dit précédemment, ces deux pôles sont à un niveau, à un potentiel différent, un *courant électrique* va prendre naissance et circuler dans le fil.

Il est vrai que ce n'est pas tout de vous affirmer que ce courant électrique traverse le fil : il faut le prouver. Essayons.

Le courant liquide, lui, se laisse observer facilement : il suffit d'examiner attentivement le mouvement des particules solides en suspension dans le liquide à l'entrée et à la sortie du tuyau (fig. 5). Nous pourrions encore avoir la preuve de l'existence de ce courant en nous basant sur le frottement que le liquide exerce contre les parois, frottement qui se traduit comme toujours par un dégagement de chaleur — les jeunes gymnastes qui se laissent glisser trop vite le long d'une corde lisse l'apprennent à leurs dépens —. Seulement, ici, le frottement est bien faible et il nous faudrait un thermomètre bien sensible pour le constater.

Le courant électrique, au contraire de l'autre, ne se laisse pas voir volontiers, mais il produit dans les conducteurs qu'il traverse un « frottement » très énergique. Aussi, quand la source d'électricité est suffisante pour cela, le fil *s'échauffe-t-il* fortement. Le courant ne se gênerait même pas, si les conditions étaient favorables, pour *porter à l'incandescence*, pour *fondre* même notre conducteur : c'est justement cette propriété qui est mise à profit pour porter au blanc éblouissant le filament de charbon des lampes électriques à incandescence.

Mais par exemple, ne nous attendons pas à constater de pareils effets avec la pile trop faible que nous avons à notre

(1) Si surprenante que paraisse cette pénétrabilité des métaux par l'électricité, c'est en somme un phénomène analogue à la propagation de la chaleur le long d'une barre métallique chauffée à l'une de ses extrémités. Il y a pourtant cette légère différence que la propagation de la chaleur est extrêmement lente, tandis que celle du courant électrique se fait à la vitesse respectable de quelque 300.000 kilomètres, — 8 fois le tour de la terre — par seconde!

disposition ; ne soyons même pas surpris si l'échauffement est tellement faible que nous ne pouvons le constater !

Mais alors, et la preuve que vous réclamez !... Patience.

Pour vous la fournir, cette preuve, nous allons nous adresser à une propriété du courant électrique qui, celle-là, est sans analogie hydraulique évidente. Cette propriété, c'est l'action du courant électrique sur l'aiguille aimantée, action bien curieuse découverte par le Danois Ørsted en 1820.

Prenez une aiguille à coudre, aimantez-la en la frottant dans sa longueur avec un de ces petits aimants en fer à cheval que le moindre bazar vous procurera pour quelques sous. Manipulez-la ensuite quelques secondes entre vos doigts, puis — délicatement — laissez-la tomber à plat, d'une hauteur

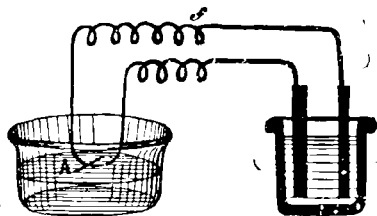


Fig. 7.— L'aiguille de la boussole est affolée par l'approche du fil qui joint les deux pôles d'une pile : Preuve que ce fil est dans un état spécial.

d'un quart de centimètre, sur la surface tranquille de l'eau d'une cuvette (fig. 7).

Vous constatez du coup deux choses surprenantes :

D'abord, l'aiguille, au lieu de tomber au fond de la cuvette, *flotte à la surface* du liquide. Diable ! les lois de la pesanteur ne seraient-elles qu'un vain mot ? Nullement. Mais votre, épiderme, si propre que vous vous flattiez de l'entretenir, s'est chargé de recouvrir l'aiguille d'une légère couche de graisse qui l'a rendue insubmersible à la faveur d'une singulière action capillaire.

En outre, vous remarquez que l'aiguille, après avoir tourné d'une certaine quantité, s'arrête définitivement dans une direction que vous constatez être assez exactement celle du Sud au Nord. — Mais c'est une *boussole* que nous venons de

construire... — Sans doute... Et n'est-ce pas cette mystérieuse indication de l'aiguille aimantée, persistante et muette comme une obsession, qui a lancé vers la formidable nuit du Pôle tant d'audacieux explorateurs?...

Trêve de dissertations!...

Notre boussole établie — un numéro sensationnel dans notre collection d'instruments économiques — approchons-en doucement le fil qui réunit les deux pôles de la pile. Nouvelle surprise. Que se passe-t-il donc? L'aiguille, soudainement déviée de son immuable direction, donne les signes d'une agitation manifeste, et, lorsque le fil est immobile, elle tend à se mettre *en croix* avec lui sans plus se soucier de sa direction primitive que si le Pôle Nord avait été escamoté.

Ce n'est pas le fil lui-même qui trouble l'aiguille à ce point. Si en effet, *sans l'éloigner de l'aiguille*, vous le détachez de l'un des pôles, l'aiguille, revenant à elle, reprend sa direction première. Dès que nous rattachons le fil, elle perd de nouveau la tête — c'est-à-dire le nord —, et ainsi de suite. On conçoit combien tout cela doit amuser les marins de nos immenses bâtiments modernes, dont les boussoles sont entourées de toutes parts de fils transportant de puissants courants; on se doute combien cela exige de précautions. Mais en revanche combien des merveilles que nous allons passer en revue n'ont d'autre origine que cette mystérieuse affinité de l'aimant et du courant électrique!

Ne nous perdons pas de nouveau en dissertations et revenons à nos moutons. Il n'y a évidemment pas de doute que le fil perturbateur, lorsqu'il établit la jonction entre les deux pôles de la pile, est le siège d'un phénomène anormal. Nous constatons cet état spécial par le trouble de la boussole à son voisinage, nous l'avons déjà constaté, si notre pile y a mis un tant soit peu de bonne grâce, par son échauffement; nous pourrions ajouter encore nombre d'autres indices que nous retrouverons plus tard.

Répetons-le, on admet que tout cela est dû à la circulation dans ce fil d'un courant électrique analogue à un écoulement liquide et engendré par la différence de niveau électrique, par la différence de potentiel qui existe entre les pôles de la source d'électricité.

Sens du courant électrique. — On ne se figure pas bien un courant qui n'aurait pas de *sens* — sans calembour. Quel est le sens du courant électrique ?

Dans le cas du courant liquide, nous savons, nous voyons parfaitement bien que l'écoulement a lieu du niveau le plus élevé vers le niveau le moins élevé (fig. 8). Pouvons-nous trouver quelque chose d'analogue en électricité ? C'est plus difficile, puisque ce courant, nous ne le voyons pas. Cherchons cependant.

Tout d'abord, l'indication que nous cherchons, ce n'est pas l'échauffement du conducteur qui peut nous la donner : que le courant circule dans un sens ou dans l'autre, il y aura toujours frottement, partant, échauffement.

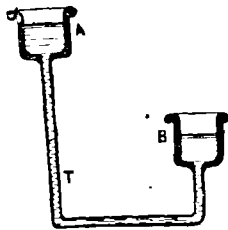


Fig. 8.

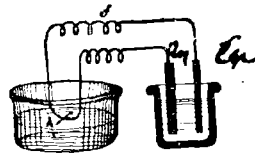


Fig. 9.

Fig. 8. — Le courant liquide dans T est dirigé de A vers B.

Fig. 9. — L'aiguille aimantée est déviée d'un côté ou de l'autre, suivant les connexions du fil avec les pôles de la pile : cela montre que suivant le cas le courant électrique passe dans un sens ou dans l'autre.

L'action sur l'aiguille aimantée, elle, va nous fournir un renseignement.

Nous avons déjà vu que cette aiguille tendait à se mettre en croix avec le fil, siège du courant, d'autant plus que le fil est plus rapproché. Répétez l'expérience avec plus de soin en maintenant le fil tout près de l'aiguille et dans la direction Nord-Sud qu'elle indiquait tout d'abord. Détachez, puis rattachiez plusieurs fois le fil à l'un des pôles. Ah ! voici une constance bien caractéristique : *toujours* la pointe de l'aiguille est déviée du même côté, par exemple, vers votre droite (fig. 9).

Maintenant, sans déranger la partie du fil voisine de l'aiguille, nous allons intervertir les attaches, les *connexions* de ses extrémités avec les pôles : l'extrémité qui touchait au

zinc de la pile, nous la mettons en contact avec le cuivre et inversement : résultat intéressant, l'aiguille est maintenant *déviée en sens contraire* de tout à l'heure, c'est-à-dire que la pointe vient vers votre gauche.

Evidemment, ces deux essais ne nous disent pas si le courant circulait tout à l'heure dans le fil dans un sens *donné*, par exemple, de droite à gauche, et maintenant en sens contraire ; mais cela nous indique sans doute que tout au moins, d'une expérience à l'autre, le sens a *changé*. Autrement dit, on ne connaît pas ce sens, mais *il semble bien qu'il y en ait un*.

Voilà tout ce qu'on peut dire, à moins de prendre l'expérience pour plus bavarde qu'elle ne l'est.

Pourtant, *par convention*, et par analogie avec un courant iquide, lorsqu'un courant électrique traverse un conducteur qui réunit deux points à des potentiels différents, comme les deux pôles d'une pile, on *admet* que le courant se dirige du point où le niveau électrique est le plus élevé au point où il est le plus bas.



Fig. 10. — Représentation schématique d'une pile.

Et, pour compléter ceci, on *admet* encore que dans une pile, c'est le métal le moins attaqué qui est au potentiel le plus élevé, qui forme, comme on dit, le pôle *positif* (ou pôle +).

Dans notre pile, c'est donc la lame de cuivre qui est le pôle positif (ou pôle +), de sorte que dans le fil qui joint ces deux pôles, le courant se dirige du cuivre vers le zinc. — Mais n'oublions pas que c'est par convention, mais qu'en réalité nous n'en savons rien !

Dans les croquis, on figure généralement une pile par deux traits parallèles comme l'indique la figure 10 : le trait fin et long représente le pôle + ; quant au pôle négatif ou pôle -, qui, étant attaqué par le liquide, *s'use* et doit donc être pris assez épais, on le représente pour cette raison par un gros trait.

Autre question, maintenant.

Le courant liquide qui s'établit entre deux vases à des niveaux différents a une conséquence, un but bien visible : il transporte à chaque instant une certaine *quantité de liquide* du vase le plus élevé au vase le moins élevé.

Et notre courant électrique, lui, qu'est-ce qu'il transporte ?

Voilà une question embarrassante. Pourtant, puisque nous nous figurons le courant électrique avec toutes les apparences d'un courant liquide, ne nous arrêtons pas pour si peu et, pour l'instant du moins, envisageons ce courant comme ayant pour effet de transporter d'un pôle à l'autre, à chaque instant, une certaine *quantité d'électricité*. Quantité d'électricité et quantité de liquide seront ainsi pour nous des grandeurs analogues au même titre que différence de niveau et différence de potentiel.

Résumons maintenant nos connaissances. Ce ne sera pas long, hélas !

RÉSUMÉ

La présence dans un liquide d'un système de deux lames métalliques séparées l'une de l'autre et inégalement attaquées par ce liquide, constitue une *pile électrique*. L'action chimique dont les piles sont le siège donne naissance à des *phénomènes électriques*, faciles à constater lorsque nous relierons par des fils métalliques chacune des *électrodes* de la pile avec notre langue (effets physiologiques), ou encore lorsque nous choquons dans l'obscurité les extrémités de ces fils, ce qui produit à chaque rupture de contact une *étincelle électrique* (effets lumineux). Ces effets sont dus à une *différence de potentiel* analogue à la différence de niveau hydraulique, et en vertu de laquelle les deux électrodes ou *pôles* de la pile sont à des *niveaux électriques différents*.

Par suite de cette différence de potentiel, un *courant électrique*, supposé analogue à un courant liquide, parcourt le fil *conducteur* avec lequel nous relierons les deux pôles, ce fil conducteur jouant pour l'électricité le rôle d'un tuyau par rapport aux liquides. Le courant ainsi produit est décelé tant par

l'échauffement du conducteur, pouvant aller jusqu'à l'incandescence et à la fusion (effets calorifiques, lampes à filament de charbon), que par *l'action perturbatrice* exercée sur l'aiguille aimantée (effets électro-magnétiques). *Par convention*, on admet que ce courant circule, dans le fil, de l'électrode la moins attaquée, qu'on suppose être au potentiel le plus élevé (pôle positif ou +) vers l'électrode la plus attaquée, qu'on suppose être au potentiel le plus bas (pôle négatif ou —). Ainsi, dans une pile zinc-cuivre-acide sulfurique, c'est le cuivre qui constitue le pôle positif.

Nous pouvons nous représenter ce courant électrique comme ayant pour effet de transporter à chaque instant du pôle positif vers le pôle négatif une certaine *quantité d'électricité* analogue à une quantité de liquide.

CHAPITRE DEUXIÈME

LA MESURE DANS LES PHÉNOMÈNES ÉLECTRIQUES

Nous avons vu tout à l'heure quelques phénomènes ; j'ai pu, je l'espère du moins, vous en faire saisir le mécanisme. Mais l'électricité ne serait pas une science qui se respecte si elle se bornait là, si elle n'était pas capable d'introduire la *mesure* dans l'étude de ces phénomènes. C'est donc de mesure que nous allons nous occuper maintenant et, faut-il vous l'avouer, cela n'est pas très amusant.

Revenons à nos deux vases communicants A et B (fig. 11).

Il est bien évident que le courant circulant dans le tuyau de jonction T *dépend de la différence de niveau* qui existe entre A et B. Selon que ces deux vases sont placés à des niveaux plus ou moins différents, le courant liquide dans T *est plus ou moins rapide* : Ainsi, à chaque valeur de la différence de niveau correspond une certaine valeur du courant produit, de sorte qu'on serait fort embarrassé, dans l'étude de l'écoulement des liquides, si l'on ne savait mesurer une différence de niveau. Mais chacun sait que cette mesure s'effectue facilement à l'aide d'un instrument qui est le fil à plomb et d'une unité de mesure que l'on appelle le mètre.

Au même titre que la différence de niveau hydraulique, la différence de potentiel électrique d'une pile est évidemment une *grandeur* susceptible de *valeurs* plus ou moins grandes et ces valeurs doivent influencer sur l'importance des effets électriques produits par cette pile. Dès lors que la différence de potentiel — que la *diff. de pot.*, écrivons-nous à l'avenir pour simplifier — est susceptible d'affecter des valeurs différentes, il est nécessaire aussi de savoir la mesurer.

Ici, une observation. Vous seriez certainement bien embar-

rasé pour apprécier la valeur des objets si vous n'aviez pas d'unité de monnaie. Vous ne le seriez pas moins pour mesurer une longueur si vous n'aviez pas de mètre, c'est-à-dire d'unité de longueur. Egalement, nous ne pourrions non plus mesurer une diff. de pot. si nous n'avons d'abord fait choix d'une *unité de diff. de pot.* Or, vous savez que l'unité de longueur, le mètre, a été obtenue en choisissant une longueur convenable, facile à manier, d'une dimension voisine de celle des objets usuels ; vous savez que pour l'unité de valeur, le franc, on a choisi une valeur comparable à celle des objets usuels, au

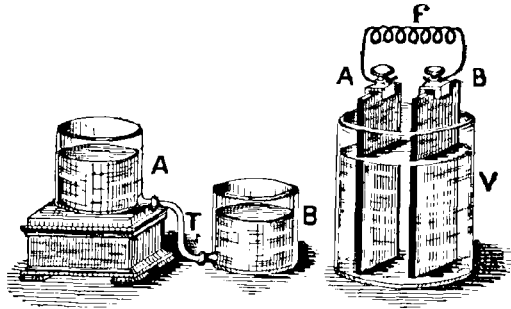


Fig. 11.

Fig. 12.

Fig. 11. — La valeur du courant liquide dans T dépend de la différence du niveau entre A et B.

Fig. 12. — La valeur du courant électrique dans f dépend de la différence de potentiel entre les électrodes.

prix de la journée d'un ouvrier ; de même on a pris comme unité de diff. de pot. une différence de potentiel voisine de celles que développent les sources d'électricité les plus répandues, les piles électriques.

Cette unité, on l'a appelé le **volt**, du nom de Volta, le célèbre professeur italien que son empilement de petites rondelles devait conduire à l'immortalité.

Ainsi, de même qu'une différence de niveau se mesure et s'exprime en mètres, une différence de potentiel se mesure et s'exprime en volts.

Pour mesurer une différence de potentiel, nous chercherons donc, à l'aide d'instruments que nous étudierons plus tard sous le nom de *voltmètres*, combien cette différence de potentiel contient l'unité, ce que nous exprimerons, la mesure une

fois faite, en disant que cette diff. de pot. est de *tant de volts*.

Il est une différence de potentiel qui mérite une mention particulière.

Lorsque nos deux éternels vases A et B étaient reliés par le fatidique tuyau T (fig. 13), le courant qui circulait dans celui-ci avait pour conséquence évidente de faire *diminuer* la différence de niveau entre ces deux vases. Pour une raison analogue et que nous tâcherons d'expliquer plus clairement un peu plus tard, on conçoit également que la différence de potentiel entre les deux pôles d'une pile est toujours *plus petite* si ces pôles sont reliés par un conducteur que si la

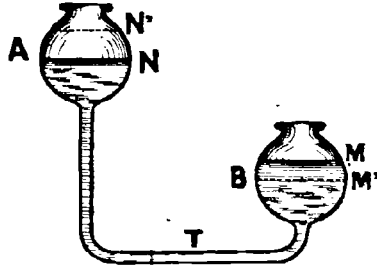


Fig. 13. — Le debit de A à B a pour effet de faire tomber la diff. de niveau de N' M' à N M.

pile ne débite pas.

Dans ce dernier cas, la différence de potentiel entre les pôles de la pile, la *différence de potentiel aux bornes*, comme on dit en « argot » d'électricien, est donc plus grande que dans tous les autres.

Aussi, tout en continuant à la mesurer en volts, donne-t-on à cette différence de potentiel d'une pile qui ne débite pas un nom spécial : on l'appelle *force électromotrice* (en abrégé f. é. m.), nom parfaitement justifié puisque c'est cette force électromotrice qui est *la cause* du courant lorsqu'on réunit les deux pôles par un conducteur. Et si, malgré cela, vous ne voyez dans ce nom nouveau d'une chose déjà connue, que prétexte à vous ennuyer, je vous dirai que tandis que la différence de potentiel aux bornes d'une pile qui débite, peut affecter toutes les valeurs comprises entre 0 et la dite force

électromotrice, cette force électromotrice, au contraire, présente l'intéressante particularité d'être, épuisement du liquide à part, fixe et immuable pour un type de pile déterminé. Ainsi, toutes les piles d'un même système, quelle que soit leur forme, quelle que soit leur grandeur, ont même force électromotrice si les substances qui les constituent sont les mêmes ; par exemple, la f. é. m. des piles Leclanché est de 1,5 volt, celle des piles-bouteilles au bichromate, de 2 volts.

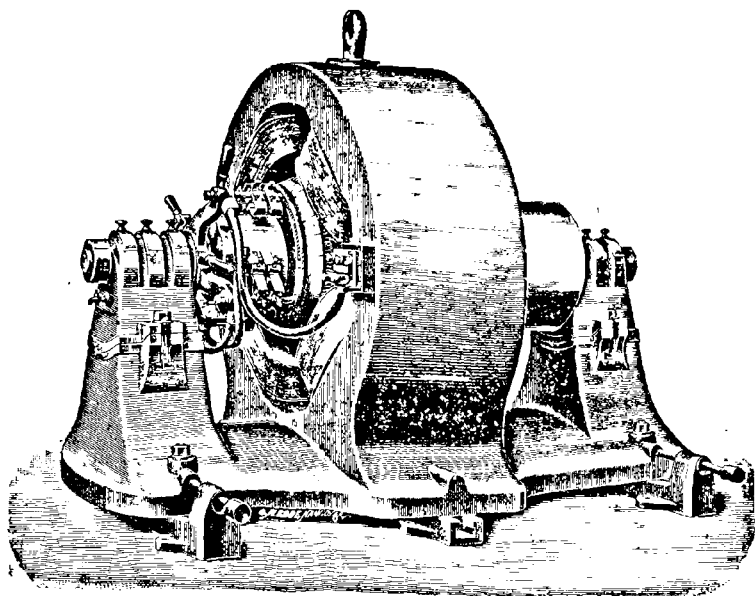


Fig. 14. — Dynamo donnant 120 volts.

Quant à la copie de la pile Volta qui nous a servi jusqu'ici pour nos expériences, elle ne donne pas, elle, beaucoup plus d'un demi-volt.

Disons d'ailleurs que d'une manière générale, la f. é. m. des différents systèmes de piles usuelles varie de un peu moins de 1 volt à un peu plus de 2. Ce n'est donc pas très étendu comme échelle.

En revanche, à côté des piles, il est d'autres sources d'électricité, qui donnent d'ailleurs naissance, à la grandeur près, aux mêmes phénomènes que nous avons étudiés dans le cas de la pile, mais dans lesquelles les f. é. m. sont bien diffé-

rentes. Ces appareils, dont nous aurons l'occasion de revoir quelques-uns en détail, sont d'abord les *piles thermo-électriques*, dans lesquelles ce n'est plus l'action chimique, mais

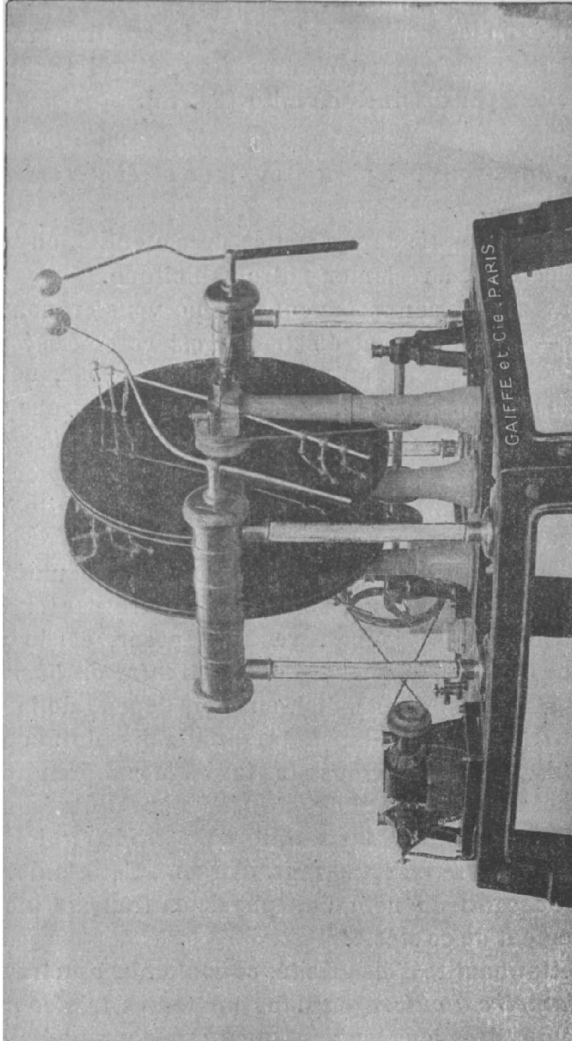


Fig. 45. — Machine statique conduit par un moteur électrique et donnant des dizaines de mille volts.

l'action calorifique qui produit l'électricité. Là, les f. é. m. développées sont si petites que c'est en *millivolts*, millièmes de volts, et même en *microvolts*, millionnièmes de volts, qu'il faut compter.

Ce sont ensuite les machines *dynamos* (fig. 14), dans lesquelles l'énergie mécanique est mise à profit, et qui donnent, suivant leur construction, depuis quelques volts jusqu'à plusieurs milliers de volts.

Ce sont enfin les machines *statiques*, les vieilles machines à frottement dont s'amusaient nos pères, et qui fournissent les volts, elles, par dizaines de mille (fig. 15).

Ouf!... dites-vous ? Mais ce soupir de soulagement est un peu prématuré...

C'est en effet, après la différence de potentiel, au tour du courant électrique à réclamer notre sollicitude.

Vous avez déjà admis — peut-être ne vous en souvenez-vous plus — que ce courant électrique est caractérisé par le transport d'un pôle à l'autre de quelque chose, nous ne savons pas au juste quoi, mais que nous nous figurons volontiers être analogue à un liquide. Cette *quantité d'électricité*, comme nous l'avons appelée par analogie, qui traverse un conducteur en un certain temps, disons tout de suite qu'on sait la mesurer :

Il suffit d'interposer sur le passage du courant une dissolution d'un sel métallique, sulfate de cuivre par exemple, que le courant, en se jouant, va décomposer, et de peser, au bout de ce temps, la quantité de métal *mise en liberté* par le courant. Le poids de ce métal, en effet, dépend de la quantité d'électricité qui a passé à travers la dissolution *et de cela seulement* : nous verrons plus tard à le comprendre.

On a choisi comme *unité de quantité*, pour des raisons que je n'indiquerai pas ici, la quantité d'électricité qui dépose 0,327 mgr. de cuivre ou 1,118 mgr. d'argent. Cette unité a été baptisée **coulomb**, du nom d'un physicien français mort au commencement de ce siècle.

Mais cette quantité d'électricité, ce coulomb, a pu traverser notre *voltmètre à cuivre* ou dans un temps très court, ou dans un temps très long, suivant que notre courant était plus ou moins *intense*.

L'*intensité* d'un courant, voici donc une nouvelle grandeur qui intervient et nous ne pouvons pas faire moins que de lui donner, à elle aussi, son unité. Si le courant est capable de

déposer beaucoup de métal en peu de temps, autrement dit, s'il transporte beaucoup de coulombs en un temps très court, il est très intense et réciproquement. L'intensité se mesure donc au nombre de coulombs transportés d'un pôle à l'autre dans l'unité de temps et le courant que nous prendrons comme unité sera par suite celui qui transporte *un coulomb par seconde*.

L'intensité est une grandeur qui intervient à chaque pas en électricité et le nom de *coulomb par seconde* serait trop long à répéter constamment : aussi a-t-on préféré donner un nom spécial à cette unité, et le *coulomb par seconde* s'appelle tout simplement l'**ampère**.

Saluons ! La science française est bien représentée, comme on voit, dans cette nomenclature établie par l'entente commune des savants de tous les pays

Des intéressantes (?) considérations qui précèdent, on peut conclure que pour mesurer l'intensité d'un courant, il suffira de constater par la quantité de métal déposée dans un voltamètre combien il passera de coulombs pendant un nombre donné de secondes. On divisera alors le premier nombre par le second et on aura ainsi l'intensité en ampères. Si par exemple il passe 3.000 coulombs en 10 minutes ou 600 secondes, le courant sera de $\frac{3.000}{600} = 5$ ampères. Représentons ceci par une formule générale : Appelons I l'intensité en ampères du courant qui transporte Q coulombs en T secondes, on aura $I = \frac{Q}{T}$.

Par exemple, un courant qui transporte d'un pôle à l'autre 25 coulombs en 5 secondes est un courant de $I = \frac{Q}{T} = \frac{25}{5} = 5$ coulombs par seconde ou 5 ampères.

Ajoutons que le moyen de mesure que nous venons d'indiquer n'est presque jamais employé industriellement. Dans la pratique, on ne s'amuse pas à compter des coulombs ; on va beaucoup plus vite que cela en intercalant sur le passage du courant un *ampèremètre*, instrument qui indique directement l'intensité ainsi que nous aurons l'occasion de l'expliquer, comme le *voltmètre* (ne pas confondre avec *voltamètre*) indique directement les diff. de pot. (voir page 22).

Autre remarque, avant de terminer, et qui prouvera com-

bien j'avais raison au début d'insister sur ce point que phénomènes électriques et hydrauliques n'offrent pas une identité absolue, mais de simples analogies superficielles :

Pourquoi le courant qui traverse le tuyau de jonction des deux vases A et B devient-il plus intense lorsque la différence de niveau augmente? Parce que, me répondez-vous, la *rapidité* du courant augmente et qu'il passe ainsi plus de liquide dans l'unité de temps. Effectivement.

Mais dans le cas du courant électrique, il n'en est plus ainsi, bien que l'intensité augmente également avec la différence de potentiel : on a fait des expériences précises à ce sujet, et on a constaté que la vitesse du courant électrique est sensiblement indépendante de la grandeur de la différence de potentiel agissant : que la *pression électrique* agissant aux extrémités d'un conducteur soit réduite de 1.000 volts, par exemple, à 10 volts, à 1 volt même, le courant n'en continuera pas moins son petit bonhomme de chemin... à une allure voisine de 300.000 kilomètres par seconde !

C'est que le courant électrique n'est pas ce qu'un vain peuple pense ; c'est que notre image de l'écoulement liquide n'est qu'une fiction grossière, bien éloignée de la réalité ; c'est qu'il s'en faut que le courant soit condensé, étouffé dans l'étroite conduite où nous avons la prétention de l'avoir emprisonné !

Rappelez-vous l'aiguille aimantée, sur laquelle il agit à distance...

Nous touchons à de graves questions : Aussi restons-en là... pour le moment !

RÉSUMÉ

Les phénomènes électriques, comme les autres, sont susceptibles d'affecter des valeurs différentes et doivent dès lors être mesurés. Pour cela, il faut d'abord, pour chaque sorte de grandeur choisir une *unité*. Pour la diff. de pot. cette unité est le *volt*. On appelle force électromotrice (f. é. m.) la diff. de pot. aux bornes d'une source d'électricité qui ne débite pas. Cette f. é. m. qui s'exprime également en volts, est fixe pour un type de pile donné et ne dépend ni de la forme, ni de la grandeur de

celle-ci. Les f. é. m. des différentes sources d'électricité sont très variables suivant la nature de ces sources.

La quantité d'électricité transportée d'un pôle à l'autre par un courant se mesure en *coulombs*, le coulomb étant la quantité capable de déposer dans un *voltamètre* convenable 0,327 mgr. de cuivre.

Suivant qu'une quantité donnée d'électricité est transportée par un courant en un temps plus ou moins court, ce courant est plus ou moins *intense*. On mesure donc son intensité par le nombre de *coulombs par seconde* qu'il peut transporter. Le coulomb par seconde s'appelle *l'ampère*.

La vitesse du courant électrique, contrairement à celle du courant hydraulique, ne dépend pas de la diff. de niveau qui le détermine. Ceci provient de ce que courant électrique et courant hydraulique sont au fond des choses bien différentes.

CHAPITRE TROISIÈME

CONSIDÉRATIONS SUR LES PILES USUELLES

DÉPOLARISATION

La pile électrique que vous manipulez depuis le commencement de ces lignes n'a pas la prétention — heureusement pour elle — d'être une pile industrielle. Hâtons-nous de le dire pour détruire les illusions que vous pourriez nourrir à son sujet. C'est même un fort mauvais instrument, qui n'a pour lui que sa simplicité. Si vous essayiez de l'appliquer à un usage pratique, de lui faire produire un courant un peu intense, vous ne tarderiez pas à en avoir la meilleure preuve en constatant que ce courant, après quelques instants de bonne volonté, s'affaiblit rapidement jusqu'à extinction complète.

Pourquoi cette faillite lamentable après cet heureux début ? Il y a là un phénomène assez curieux à étudier.

Nous avons remarqué, dès nos premiers pas en électricité, qu'une des conséquences des actions chimiques qui s'exercent dans la pile est un dégagement d'hydrogène sous forme de bulles gazeuses sur le zinc, si la pile *ne débite pas*. En y regardant de plus près, nous pourrions voir que lorsque la pile *débite*, c'est sur le cuivre que l'hydrogène vient se dégager. Or, dans ce dernier cas, les bulles ont tôt fait de recouvrir l'électrode positive d'une couche, d'une *gaine gazeuse* de plus en plus épaisse. Cette gaine, espèce de vernis non conducteur enveloppant l'électrode, oppose à la production des effets électriques un obstacle très grand que nous nous expliquerons aisément lorsque le niveau de nos connaissances se sera exhaussé jusqu'à la conception de la *résistance intérieure* d'une pile.

C'en est assez, toutefois, que vous soyez au courant de ces faits pour que votre perspicacité mise en éveil trouve immédiatement le remède au mal dont souffre notre instrument : puisque la gaine gazeuse est la coupable, il suffira, dites-vous, de faire en sorte qu'elle ne puisse plus se former. Ceci est parfaitement exact. Ce n'est toutefois que poser le problème, et sans doute n'est-il pas si facile à résoudre, car nos éminents électriciens y sont attelés depuis la création de la

pile : ils l'énoncent dans leur argot spécial en disant qu'il faut empêcher la pile de se *polariser*.

Les résultats de ces efforts, il faut l'avouer, n'ont pas été inutiles.

On sait très bien maintenant empêcher une pile de se polariser.

On n'a même que l'embarras du choix parmi les méthodes proposées.

Le procédé le plus naturel consiste à enlever mécaniquement les bulles, à mesure de leur formation, soit par l'agitation continue, soit par insufflation perpétuelle d'un courant d'air au sein du liquide. On comprendra aisément que si ce moyen est le plus naturel, il n'est pas en tout cas le plus pratique : si « souffler n'est pas jouer », cela n'a pas réussi non plus comme distraction à l'usage des électriciens ; et ni les piles à agitation, ni celles à insufflation n'ont prodigué à leurs auteurs les satisfactions morales et financières que les inventeurs — êtres incorrigibles — ne manquent jamais de rêver.

On peut encore, dans une certaine mesure, empêcher la formation de la gaine par la circulation des liquides, d'où des piles dites à *écoulement*, très en faveur auprès des amateurs d'éclairage et que nous retrouverons un peu plus loin.

Un autre procédé de dépolarisation beaucoup plus pratique, beaucoup plus fréquemment employé, consiste à *manger* chimiquement l'hydrogène au fur et à mesure de sa formation, en utilisant pour cela les facultés digestives de certains produits chimiques. L'hydrogène, nous l'avons expliqué, se produit par la décomposition, au contact du zinc, de l'eau du liquide, dont l'oxygène est absorbé. Abandonné par l'oxygène, l'hydrogène se rend, à travers le liquide, vers le pôle positif sur lequel il formera, si nous n'y prenons garde, son dépôt pernicieux. Mais plaçons sur le trajet de l'une à l'autre électrode, trajet que forcément il doit parcourir, une substance très riche en oxygène, très *oxydante*, telle que le bichromate de potasse ou l'acide azotique. Les choses changent alors d'aspect, car la substance oxydante octroie d'office à l'hydrogène une partie de son oxygène, qui le retransforme en eau. Nous élevons de cette façon une barrière insurmontable aux vellétés perturbatrices de l'hydrogène, la formation de la gaine est rendue impossible et nous réalisons ainsi une pile *impolarisable*.

Comme à tant d'autres choses, c'est à un Français, Becquerel, qu'est due cette voie féconde de la dépolarisation chimique.

Il y a différentes manières d'appliquer ce principe. On se contente souvent d'ajouter la substance dépolarisante, le dépolarisant, à même le liquide acide. C'est ainsi que les piles à treuil de Trouvé (fig. 16), les piles-bouteilles de Grenet (fig. 17), toutes munies d'un dis-

positif qui permet de relever les zincs quand on a terminé l'expérience, contiennent tout simplement comme liquide excitateur une solution au 1/10 en volume d'acide sulfurique, à laquelle on a ajouté à titre de dépolarisant 150 grammes par litre de bichromate de potasse ou de soude (1).

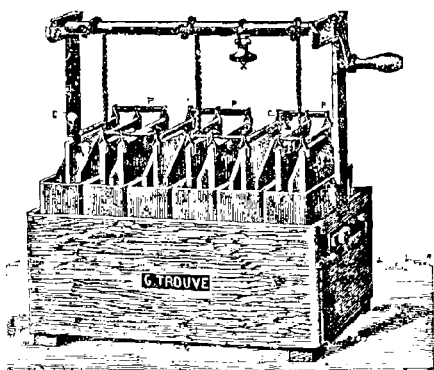


Fig. 16. — Pile à treuil de Trouvé.

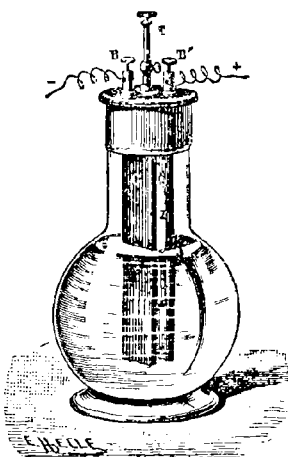


Fig. 17. — Pile-bouteille de Grenet

Les électrodes positives de ces piles sont constituées par du charbon de cornue et la force électromotrice initiale est de 2 volts.

La méthode que nous venons d'indiquer et qui consiste à mélanger simplement le dépolarisant au liquide excitateur constitue toutefois une mauvaise manière d'opérer. Cela est aisé à comprendre. Il est toujours impossible d'utiliser jusqu'au bout le liquide excitateur d'une pile à cause de l'affaiblissement graduel qui se produit lorsqu'une partie notable de l'acide a disparu. On est alors forcé de jeter le liquide excitateur. Si l'acide est seul, ceci n'est pas un grand inconvénient, l'acide sulfurique coûtant très bon marché. Si au contraire le dépolarisant y est mélangé, force est de le jeter en même temps, et c'est plus ennuyeux, car celui-ci est toujours un produit assez coûteux.

De la conception bien nette de cet inconvénient, une idée heureuse est résultée, qui a fait depuis son chemin.

PILES A DEUX LIQUIDES

On a constaté qu'il était possible de ne pas mélanger le dépolarisant au liquide acide, mais de le concentrer exclusivement là où sa présence est nécessaire, c'est-à-dire autour de l'électrode positive,

(1) Ce dernier est plus économique et préférable.

en l'enfermant, ainsi que cette électrode, dans un *vase poreux* en terre peu cuite. Ce vase, que l'on remplace quelquefois par un diaphragme de parchemin végétal, s'oppose en effet au mélange rapide des deux liquides sans toutefois empêcher le cheminement de l'hydrogène vers le pôle positif.

On peut alors jeter le liquide acide exciteur, placé dans le vase extérieur avec l'électrode négative, sans pour cela perdre le liquide dépolarisant si celui-ci est encore utilisable (1).

Cette disposition n'est pas absolue, et comme tous les goûts sont dans la nature, M. Radiguet préfère mettre électrode attaquable et liquide acide dans le vase poreux, dépolarisant et charbon à l'extérieur. Le mécanisme n'est pas changé pour si peu.

Telles sont les piles dites à *deux liquides*; liquide exciteur d'une part, liquide dépolarisant de l'autre.

Un avantage important de ces piles à deux liquides résulte du fait que le dépolarisant, au lieu d'être disséminé dans toute une masse liquide où il n'a que faire (cas des piles à dépolarisant à un seul liquide), est concentré là où son action est utile: il agit alors plus efficacement, la pile peut rester *constante* pendant un temps assez long, au lieu de présenter ce *coup de fouet* du début dont les piles à dépolarisant et à un seul liquide sont coutumières.

Influence de la nature des électrodes. — Dans la plupart des piles usuelles employées aujourd'hui, dont nous passerons quelques types en revue tout à l'heure, l'électrode positive est constituée par une ou plusieurs plaques de *charbon*. De l'électrode de cuivre de Volta, il n'est plus question.

Cette préférence se justifie aisément.

Nous avons expliqué (page 11) que dans une pile, la différence entre les potentiels des deux pôles est provoquée par la *différence*, par l'inégalité des actions chimiques sur les deux électrodes. Donc, plus grande sera cette différence d'action, plus grande aussi sera ce que nous avons appelé la force électromotrice de la pile. Vous comprenez dès lors très bien que non seulement l'action chimique qui tend à s'exercer sur l'électrode positive n'est pas utile, mais qu'elle est *nuisible*, puisqu'elle diminue l'écart entre les actions chimiques et par suite la force électromotrice.

Il résulte de ce fait qu'on doit choisir comme électrode positive

(1) Ce qui n'empêche que dans la pile Bunsen, d'après M. d'Arsonval, on n'utilise effectivement guère plus de 150 gr. par kilogr. du dépolarisant employé (acide azotique).

une lame de matière *non attaquée* du tout par le liquide : c'est pourquoi on a rejeté le cuivre, qui est légèrement attaqué par l'acide sulfurique, et pourquoi on l'a remplacé par le charbon des cornues à gaz, matière peu coûteuse, très dure, très conductrice pour l'électricité, et, de plus, absolument inattaquable par tous les liquides employés dans les piles. Toute une litanie de qualités, comme on voit. Aussi, les usines à gaz n'ont-elles bientôt plus suffi à fournir le charbon de cornue réclamé par les électriciens et toute une industrie importante s'est créée, qui a pour but de produire ce charbon artificiellement — en accentuant même ses qualités — tant pour les besoins de la fabrication des piles que pour ceux de l'électrochimie et la confection des crayons de lampes à arc.

Si l'électrode positive doit opposer au liquide l'impassibilité la plus absolue, l'électrode négative, elle, doit au contraire, mais pour la même raison, être très énergiquement attaquée.

Ainsi, une fourmillière d'inventeurs découvrent ou s'imaginent découvrir qu'on pourrait employer du fer comme électrode soluble; ce serait, en effet, très économique; on continue pourtant à donner la préférence au zinc parce que, tout en n'étant pas très coûteux, surtout relativement aux autres produits employés dans la pile, il est plus énergiquement attaqué que le fer et fournit dans les mêmes conditions une force électromotrice sensiblement plus élevée.

Par contre, il existe d'autres métaux bien plus attaquables que le zinc : tels sont par exemple l'aluminium, le lithium, le sodium. Avec ce dernier et de l'acide chromique comme liquide excita-teur, on peut obtenir jusqu'à 4,5 volts au lieu des 2 que fournissent nos meilleures piles usuelles. Malheureusement, le prix de tous ces métaux est si élevé qu'on ne peut songer à les employer dans les piles : on se contente du zinc et on se trouve heureux des 2 modestes volts qu'il donne assez économiquement dans les bonnes piles. Économiquement, entendons-nous : quand on n'a pas autre chose que des piles à sa disposition !

Amalgamation du zinc. — C'est donc le zinc que nous retrouvons dans toutes les piles, *pauvre victime...* toujours mangée ! Il faut bien ajouter, d'ailleurs, qu'il se signale encore à l'attention des électriciens et se recommande à leur faveur par une propriété fort intéressante.

Si vous constituez l'électrode négative d'une pile par une lame de zinc *ordinaire*, il vous sera aisé de constater que cette lame se dissoudra dans le liquide très rapidement et sans se soucier le moins du monde si la pile travaille sur un conducteur extérieur ou si au

contraire elle n'a à fournir aucun courant, étant, comme on dit, à *circuit ouvert*. De là l'expression qu'une telle pile *use à circuit ouvert*, défaut bien grave puisqu'elle consomme des produits coûteux et ne nous donne rien en échange.

Voilà un point de ressemblance fâcheux avec la plus noble conquête de l'homme, le cheval... de fiacre, qui, à l'écurie ou dans l'exercice de ses fonctions, avale son picotin d'avoine avec la même avidité.

Amalgamons au contraire au préalable notre lame de zinc sur toute sa surface, en la brossant avec une brosse dure dans une cuvette renfermant du mercure et de l'acide sulfurique étendu. En employant cette lame comme électrode négative dans une pile à deux liquides, nous constaterons qu'elle ne s'use plus que très peu — pas du tout dans certaines piles — lorsque l'élément ne débite pas. Pour qu'il y ait usure, il faudra que nous fassions débiter la pile.

On peut expliquer cela approximativement en remarquant que quand la pile ne débite pas, c'est *sur le zinc* que se dégage l'hydrogène, lequel a lestement recouvert le métal de la gaine gazeuse que nous connaissons bien. De là, impossibilité pour le liquide d'arriver au métal et par suite, cessation de l'attaque. C'est donc encore une sorte de polarisation qui intervient ici, mais polarisation protectrice cette fois, et presque instantanée, puisque le gaz n'a qu'à rester à l'endroit même où il est produit. Dès l'instant, au contraire, où l'on fait débiter, le gaz se porte, comme nous le savons, sur l'autre électrode et permet à l'action chimique de s'exercer à nouveau, avec vigueur, sur la surface redevenue nette du métal négatif.

La pile, dans ces nouvelles conditions, ne dépense donc plus que proportionnellement à ce que nous lui demandons : elle cesse, à peu près, de brûler ses produits dès que nous avons fini de nous en servir, et ceci, sans que nous ayons à nous en occuper. Ce n'est donc plus au lamentable cheval de fiacre qu'il convient de comparer la pile perfectionnée par l'amalgamation du zinc, mais à l'automobile, qui ne dépense que lorsqu'il travaille et ne songe pas, au repos, à absorber sa réserve de pétrole.

Mais, pour que tout ceci soit exact, il faut que l'amalgamation soit entretenue soigneusement. Quelquefois, dans ce but, la partie inférieure du zinc plonge dans un petit récipient rempli de mercure, d'où ce métal monte par capillarité sur toute la surface de l'électrode.

Une autre pratique, très recommandable, consiste à amalgamer le zinc dans la masse : on fait bien sécher le mercure, afin d'éviter les projections, on l'enferme dans un cornet de papier et, au moyen d'une

cuiller, on le plonge dans le zinc en fusion. L'amalgamation se produit très vite et il faut rapidement couler dans des moules, afin d'éviter l'évaporation du mercure.

Dans tous ces procédés, le mercure ne prend aucune part aux réactions chimiques : le zinc usé, on le retrouve intégralement à l'état de globules au fond des éléments.

Quelles que soient les louanges que nous avons décernées à l'amalgamation, nous devons constater que, dans certains cas, l'action protectrice du mercure est illusoire. Ainsi, dans les piles à bichromate à un seul liquide que nous avons rencontrées (page 31), un dispositif spécial est affecté au relèvement des zincs au-dessus du liquide. Si en effet on ne prenait pas cette précaution dès qu'on a fini de se servir de la pile, les zincs, si bien amalgamés qu'on les suppose, auraient tôt fait d'être rongés.

Ceci se comprend facilement, d'ailleurs, puisque dans ces piles, le dépolarisant, existant dans toute la masse du liquide, *mange* l'hydrogène partout où il le trouve, s'opposant aussi bien à la formation de la gaine protectrice sur le zinc de la pile au repos, qu'à celle de la gaine perturbatrice sur le charbon de la pile en activité (1).

Mais, même dans ce cas, l'amalgamation se justifie en ce qu'elle diminue la dépense de zinc pour une même quantité d'électricité produite.

PILES PRATIQUES

Donnons maintenant à nos lecteurs une idée des piles usuelles par l'examen rapide de quelques-uns des types les plus connus. Nous avons déjà, à propos des piles à dépolarisant et à un seul liquide, dit quelques mots des batteries à treuil et des piles-bouteilles et nous venons de voir que, fortement attaqués même à circuit ouvert, les zincs de ces piles doivent être maintenus en dehors du liquide quand on ne s'en sert pas. En outre, en activité, la pile dépense deux ou trois fois plus de zinc qu'il n'est théoriquement nécessaire. Enfin, elle est peu constante. Ces propriétés ne plaident pas très éloquemment en faveur de ce genre de piles et il faut leur préférer les piles à deux liquides.

(1) On peut expliquer les faits d'une autre façon, qui revient au même, en disant que l'oxygène nécessaire à la dissolution du zinc pouvant être fourni bien plus aisément par le dépolarisant que par l'eau, celle-ci n'est pas décomposée et ne dégage donc pas d'hydrogène protecteur, d'où attaque à circuit ouvert.

Pile Daniell et ses modifications. — Inventée vers 1836; quelques cheveux blancs sur la conscience; malgré cet âge respectable, est restée sans rivale jusqu'à ce jour au point de vue de la constance (fig. 18).

Sous sa forme moderne — *fin de siècle* étant passé de mode — la pile Daniell comporte un vase de verre renfermant la solution acidulée sulfurique et le zinc amalgamé habituels, tandis qu'un vase poreux central renferme une lame de cuivre rouge percée de trous et plongeant dans une solution de sulfate de cuivre maintenue saturée à l'aide d'une réserve de cristaux de ce sel. Du sulfate de zinc se forme à l'extérieur tandis que le sulfate de cuivre, réduit par l'hydrogène, dépose une couche de cuivre sur l'électrode positive. F. é. m. = 1,08 volt. Ne convient que pour produire des courants assez faibles, 1 à 2 ampères.

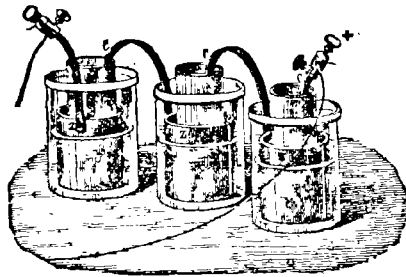


Fig. 18. — Piles Daniell.

Comme toutes les bonnes choses, la pile de Daniell a été le point de mire d'une multitude d'inventeurs. Ses modifications se comptent par douzaines, pas meilleures les unes que les autres, naturellement. Pourtant, faisons une mention spéciale pour l'Allemand Meidinger et le Français Callaud, qui ont supprimé le vase poreux en utilisant pour la séparation des deux liquides leur différence de densité.

Pile Bunsen. — A deux liquides, comme sa camarade. Mais le dépolarisant est de l'acide azotique, auquel M. d'Arsonval préfère toutefois un mélange à parties égales d'acides chlorhydrique et azotique augmenté de son volume d'eau. Dans le vase poreux (fig. 19), plongeant dans le dépolarisant, est l'électrode positive constituée par un prisme de charbon.

D'un emploi moins qu'agréable par suite des vapeurs nitreuses, épouvantables à respirer, qui se dégagent pendant le fonctionnement.

F. é. m. = 1,9 volt au début. Peut fournir des courants très

intenses, allant pratiquement à 5 ampères et plus pour un élément de 20 centimètres de haut.

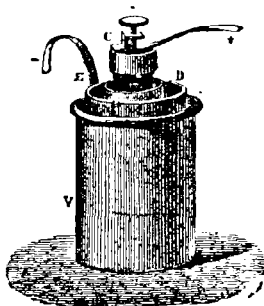


Fig. 19. — Pile Bunsen.

Pile Radiguet. — Les piles dans lesquelles le dépolarisant est du *bichromate* de potasse ou de soude n'ont pas les inconvénients... olfactifs de la pile Bunsen.

De plus, l'amalgame du zinc, à condition d'être parfaite, produit d'excellents résultats dans celles de ces piles qui sont à deux liquides. Aussi en existe-t-il un grand nombre, toutes plus

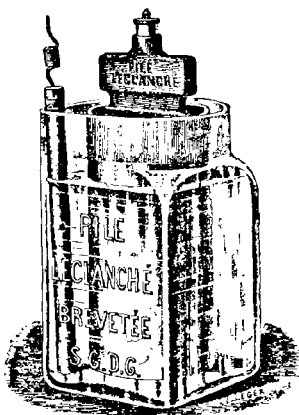


Fig. 20. — Pile Leclanché.

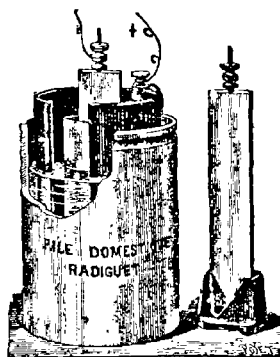


Fig. 21. — Pile Radiguet.

idéales les unes que les autres au dire de leurs inventeurs, pour le plus grand embarras du monsieur amateur qui ne s'y connaît pas.

La pile Radiguet est l'une des meilleures.

Le dépolarisant, contrairement à l'habitude, est à l'extérieur, ainsi que le ou les charbons. Le zinc en rognures et le liquide excitateur sont dans le vase poreux, disposition qui permet de faire plonger la partie inférieure du zinc dans une petite cuvette remplie de mercure. L'amalgamation reste ainsi parfaite, le zinc peut rester indéfiniment dans le liquide sans la moindre attaque, de sorte que la pile est toujours *sous pression*, prête à entrer en service, à faire jaillir la lumière dès qu'on en a besoin.

F. é. m. initiale, 2 volts. L'élément de 21 centimètres de hauteur peut débiter 2,5 ampères pendant 10 à 12 heures, après quoi il faut renouveler l'eau acidulée du vase poreux. Le dépolarisant, lui, dure quatre fois plus de temps.

Piles Leclanché. — La pile la plus employée en France : met en branle les 99 centièmes des milliers de sonneries qui tintent dans notre beau pays ; cela vaut bien qu'on s'y arrête un peu (fig. 20).

Cette pile, dont le liquide excitateur, solution à 150 grammes par litre de sel ammoniac, n'a à grignoter qu'un simple petit bâton de zinc, est à dépolarisant *solide* : c'est une substance que l'on trouve en abondance dans la nature, le bioxyde de manganèse. Mais l'action dépolarisante de cette substance est très lente. Si on demande à la pile un courant intense, la dépolarisation n'est pas assez rapide pour empêcher la gaine perturbatrice de se former après quelques instants et le courant baisse rapidement. Si l'on cesse alors de faire travailler la pile, l'action dépolarisante continue lentement et remet bientôt la pile en état de fonctionner.

Evidemment, nous n'avons plus là une pile très constante, comme il est absolument nécessaire lorsque par exemple nous voulons alimenter une lampe, mais ces conditions sont parfaitement suffisantes lorsque nous n'avons besoin que d'un travail *intermittent*. Et que de qualités alors ! non-seulement les produits qu'elle emploie sont des moins coûteux, mais encore l'absence d'usure lorsque la pile ne fonctionne pas est *absolue*, ce qui provient de ce que le dépolarisant, étant solide, ne peut venir faire d'excursion indiscreète autour du zinc. Aussi, une fois changés, trois ou quatre éléments peuvent-ils alimenter pendant des mois et des mois sans qu'on ait à s'en occuper, sonneries, téléphones, horloges électriques.

Et pour tout cela, durant tout ce temps, deux ou trois petits bâtons de zinc à peine à se mettre sous la dent...

Que pèse le chameau devant une telle sobriété !

CHAPITRE QUATRIÈME

NOTION DE RÉSISTANCE

Intensité et différence de potentiel sont devenues pour nous des grandeurs familières. Passons maintenant à une notion extrêmement importante que nos deux vases communicants, véritables bouteilles de Robert-Houdin, vont nous livrer avec leur bonne grâce accoutumée.

Il faudrait, en effet, que vous fussiez de bien mauvaise composition pour ne pas admettre que l'intensité du débit liquide entre ces deux vases dépend *des dimensions du tuyau* de communication. Mettons pourtant les points sur les *i*.

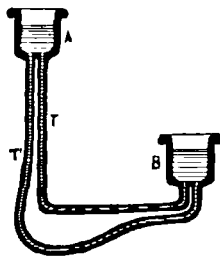


Fig. 22.

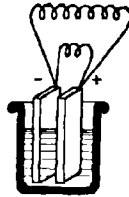


Fig. 23.

Fig. 22. — Les deux vases A et B étant reliés par deux tuyaux de même grosseur mais l'un T' plus long que l'autre T, le liquide passe moins aisément dans T'.

Fig. 23. — Les deux pôles de la pile étant reliés par deux conducteurs de même section mais l'un plus long que l'autre, le courant éprouve une plus grande résistance à passer à travers le conducteur le plus long.

Ajoutons à côté du premier tuyau T un second tuyau T' de même diamètre que T, mais plus long (fig. 22). Il est bien certain que le liquide éprouvera plus de difficulté pour traverser ce tuyau que pour traverser le premier, et on devra par suite s'attendre à le voir parcouru par un courant liquide *moins intense*. C'est ce qui a lieu effectivement. D'où la

conception de la *résistance* opposée au passage du courant-liquide dans les tuyaux : nous définirons cette grandeur en disant que *plus la résistance du tuyau est grande, plus est faible le courant qui le traverse* sous l'action d'une certaine différence de niveau. Il est donc évident que la résistance d'un tuyau *augmente avec sa longueur*.

Je suppose maintenant que la communication entre A et B soit assurée (fig. 24) par deux tuyaux T, T', de même longueur, mais de *sections* différentes. Grave question : le débit sera-t-il moindre dans le petit tuyau que dans le gros ? J'imagine que la réponse ne fait pas de doute pour vous ; et d'après la définition précédente, nous concluons que le petit tuyau oppose au passage du courant une résistance *plus grande*. La résistance d'un tuyau *augmente* donc lorsque sa section *diminue*.

Le courant électrique ayant été assimilé à un écoulement, vous ne serez pas étonné de voir ces conclusions s'appliquer textuellement aux conducteurs électriques :

1° De deux conducteurs de même nature, de même section et de longueurs différentes, *le plus long* offre au courant le passage le plus difficile, *la plus grande résistance* : Si nous relierons les deux pôles d'une source d'électricité à la fois par

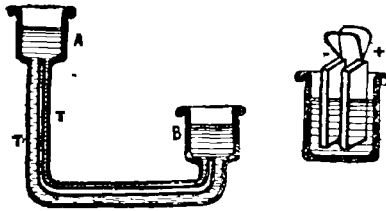


Fig. 24

Fig. 25

Fig. 24. — Les deux vases étant reliés par deux tuyaux de même longueur mais l'un T' plus gros que l'autre T, le liquide s'écoule plus facilement par T' que par T.
Fig. 25. — Les deux pôles de la pile étant reliés par deux conducteurs de même longueur mais l'un plus gros que l'autre, le courant éprouve moins de résistance au passage à travers le conducteur le plus gros.

ces deux fils (fig. 23), le courant passera *à la fois* dans l'un et l'autre fil, puisque les deux extrémités de chacun sont placées à des niveaux électriques différents ; mais il passera plus facilement, sera plus intense dans le fil le plus court : peut-être pourrions-nous constater que celui-ci s'échauffe plus.

2° De deux conducteurs de même nature, de même longueur et de sections différentes, *le plus gros* offre au courant le

passage le plus facile, *la moindre résistance*. Si donc les pôles d'une pile sont réunis simultanément par ces deux conducteurs (fig. 25), le courant sera plus intense dans le plus gros.

En réunissant ces deux observations, nous concluons que la résistance électrique, ou simplement *la résistance* d'un conducteur est d'autant plus grande que sa longueur est plus grande et sa section plus petite.

Rien de plus simple que tous ces résultats.

En hydraulique, les dimensions d'un tuyau suffisent généralement pour caractériser la résistance que ce tuyau oppose au passage d'un courant liquide. Quelquefois cependant, ce peut n'être pas suffisant.

On peut rappeler à ce sujet certaine histoire qui fit dernièrement quelque bruit dans le Landerneau parisien. Le service des eaux, ayant constaté que le débit de certaine conduite d'eau de Seine de la rue de Buffon avait diminué dans d'étranges proportions, résolut de trouver la clef du mystère. La canalisation fut éventrée et un spectacle suggestif s'offrit aux yeux affriolés des braves contribuables du quartier. Une appétissante purée remplissait aux trois quarts l'énorme conduite, dans laquelle frétillait à cœur joie la plus jolie collection de vers, d'asticots et autres aimables bestioles qu'il soit possible d'imaginer : Non contente de fournir le boire à ses abonnés, l'Administration des eaux, vraiment paternelle, prétendait en même temps leur servir le manger.

La morale de cette histoire, c'est que le débit de l'eau dans les tuyaux peut dépendre non seulement de leurs dimensions, mais aussi de ce qu'ils ont... dans le ventre. Mais à la vérité, c'est là un cas exceptionnel et qui n'est guère applicable... qu'aux tuyaux d'eau « pure » destinée à notre alimentation.

En électricité, au contraire — car c'est là que nous en voulions arriver — c'est toujours qu'il faut se préoccuper de ce que les conducteurs ont dans le ventre. Assurément ce ne sont pas des asticots qu'on peut espérer y rencontrer; mais leur *nature* est un facteur de la plus haute importance. Les différents métaux sont en effet conducteurs à des degrés très divers, le cuivre l'étant plus que l'or, l'or plus que le fer, le fer plus que le mercure etc. Ainsi, de deux fils conducteurs

de mêmes dimensions, mais l'un en cuivre et l'autre en fer, ce sera à beaucoup près ce dernier qui présentera la plus grande résistance, la moins grande *conductibilité*.

Nous voici à présent fixés sur les divers éléments qui interviennent dans la résistance d'un conducteur : la longueur de ce conducteur, sa section, sa nature.

Avant d'aller plus loin, il nous faut faire pour la résistance ce que nous avons fait pour les autres grandeurs électriques, choisir une *unité de résistance*.

Nous allons supposer pour cela qu'un fil conducteur relie les deux pôles d'une source d'électricité telle que la diff. de pot. agissante aux deux extrémités de notre conducteur soit égale à 1 volt. Si le conducteur est fin et long, sa résistance sera grande et le courant qui le parcourra sera peu intense, une fraction d'ampère par exemple.

Armé d'une paire de ciseaux, raccourcissez le conducteur petit à petit. Chaque raccourcissement, c'est-à-dire chaque diminution de résistance, se traduit, vous n'en doutez pas — bien que vous n'ayez pas encore d'autre instrument pour le vérifier que les yeux de la foi — par une augmentation du courant lorsque vous rétablissez le contact. Dans la réalité des choses, à cette augmentation progressive du débit correspondrait un abaissement croissant de la diff. de pot. aux bornes de la source (voir page 23). Mais comme ceci ne fait rien à l'affaire, nous supposons que la diff. de pot. agissante reste toujours égale à 1 volt. Ceci admis, continuez à raccourcir votre conducteur. Il vient un moment où l'intensité atteint la valeur de 1 ampère. A ce moment, la résistance du conducteur présente une valeur bien déterminée. Si par exemple c'est du fil de cuivre de 1 millimètre de diamètre que nous employons, nous constaterons que nous avons dû en réduire la longueur à 50 mètres environ. Eh bien ! c'est cette valeur particulière de la résistance que l'on a prise comme unité, et les créateurs de la nomenclature électrique internationale, pour faire plaisir aux physiciens allemands, ont donné à cette unité de résistance le nom de leur compatriote Ohm.

L'**ohm** est donc la résistance d'un conducteur tel que,

soumis à une différence de potentiel de 1 volt, il se laisse traverser par un courant de 1 ampère.

Voyons maintenant ce qui a valu à ce digne Ohm de figurer si souvent dans la conversation des électriciens, où il sert de prétexte, trop souvent, à de faciles calembours.

LOI DE OHM

Je prends un conducteur quelconque, je fais agir à ses extrémités une différence de potentiel non moins quelconque. Un courant d'une certaine valeur le traverse. J'ai ainsi un système dans lequel une différence de potentiel de E volts produit dans une résistance de R ohms un courant de I ampères. Il importe de remarquer que ces valeurs ne sont pas quelconques les unes par rapport aux autres, déterminées par un pur hasard. La preuve? Si j'augmente la diff. de pot. E en maintenant R constante, l'intensité augmente évidemment. Elle diminue au contraire si j'augmente la résistance R en laissant E constant. En d'autres termes, il suffit que je donne à deux de ces trois grandeurs une certaine valeur pour que la troisième prenne aussi une valeur bien déterminée. Il existe donc entre elles une certaine dépendance. Le mérite de Ohm est d'avoir trouvé la relation exacte qui exprime cette dépendance. Si grand que soit votre froid pour les mathématiques, force vous est bien d'apprendre que cette relation est donnée par la formule

$$I = \frac{E}{R} \quad (1)$$

ce qui signifie que le courant I circulant sous l'influence d'une différence de potentiel E dans un conducteur de résistance R a pour valeur le quotient de la différence de potentiel par la résistance.

Par exemple, si, dans un circuit donné, on a $E = 10$ volts, $R = 2$ ohms, on en conclura, sans avoir besoin de mesurer I , que le courant est de $\frac{10}{2} = 5$ ampères.

Ainsi, l'intensité est le quotient d'une division dans laquelle la différence de potentiel agissante est le dividende, et la résistance le diviseur. Un simple rappel de vos connaissances arithmétiques vous montrera dès lors qu'en multipliant le

diviseur R par le quotient I , on doit reproduire le dividende E , d'où la relation

$$E = R I \quad (2)$$

qui est effectivement une autre forme de la loi de Ohm et s'exprime en disant que la différence de potentiel E existant aux extrémités d'un conducteur de résistance R , traversé par un courant I , est forcément égale au produit de la résistance par le courant.

Si, par exemple, nous avons un conducteur de $R = 2$ ohms traversé par un courant $I = 5$ ampères, nous voyons que la diff. de pot. aux bornes $E = 2 \times 5 = 10$ volts.

Enfin, puisque d'après la formule (2) le produit de R par I est égal à E , il faut évidemment que R soit égal à $\frac{E}{I}$, car il n'y a que $\frac{E}{I}$ qui, multiplié par I soit égal à E . Ainsi

$$R = \frac{E}{I} \quad (3)$$

ce qui est une 3^e forme de la loi de Ohm et s'exprime en disant que la résistance R d'un conducteur parcouru par un courant I sous l'effet d'une différence de potentiel E est égale au quotient de la différence de potentiel par l'intensité.

Si par exemple dans un circuit donné, nous connaissons $E = 10$ volts et $I = 5$ ampères, nous en concluons que la résistance de ce circuit $R = \frac{10}{5} = 2$ ohms.

Les applications que nous avons faites de ces 3 formules à mesure de leur établissement montrent déjà que ce n'est pas pour le singulier plaisir d'ennuyer nos lecteurs que nous les avons établies; chacune, en effet, présente son utilité spéciale. On emploiera la première $I = \frac{E}{R}$ quand, connaissant dans un circuit électrique E et R , on voudra déterminer I ; la seconde $E = RI$ quand, connaissant I et R , on voudra déterminer E ; la 3^e enfin, $R = \frac{E}{I}$ si, connaissant E et I , c'est R qu'on veut déterminer.

Nos lecteurs feront bien de s'exercer à ces calculs, qui reviennent à chaque instant dans la pratique. C'est pour cela que nous avons dû y insister longuement, si fastidieux que cela ait pu paraître.

Et ce n'est pas fini, malheureusement, car il nous faut voir

maintenant comment sont reliées entre elles les résistances de conducteurs de dimensions différentes.

Nous avons déjà trouvé (page 42) que ces résistances sont d'autant plus grandes que la longueur des conducteurs est plus grande et leur section plus faible.

Maintenant que nous sommes un peu plus ferrés sur ce chapitre, nous concevrons facilement que si, par exemple, on *double* la longueur d'un conducteur, non seulement on augmente sa résistance, mais on la *double*, et que si au contraire on *double* sa section, on réduit à la *moitié* sa résistance.

Ainsi, plus précis que tout à l'heure, nous pourrions dire que *la résistance d'un conducteur est proportionnelle à sa longueur, inversement proportionnelle à sa section.*

Or, nous avons aussi appris précédemment (page 42) que cette résistance, en dehors des dimensions du conducteur, ne dépend que de sa *nature*. Ceci nous permet d'écrire, en désignant la longueur par l et la section par s , que sa résistance R est donnée par la formule

$$R = \frac{\alpha l}{s}$$

α étant un coefficient déterminé par l'expérience, particulier à chaque métal et que l'on appelle la *résistance spécifique* de ce métal. Cette formule permet d'obtenir R en ohms si on exprime la longueur l en centimètres et la section s en centimètres carrés. Quant à la résistance spécifique, elle est numériquement égale à la résistance entre les faces d'un centimètre cube de la substance. Pour des raisons un peu délicates à saisir, on exprime cette résistance spécifique en *ohms-centimètres* (1).

(1) Il faut bien se garder en effet de confondre une *résistance spécifique* avec une *résistance* et l'exprimer en ohms. Car l'équation $R = \frac{\alpha l}{s}$ nous montre qu'il faut multiplier α par une longueur l et le diviser par une surface s , ce qui revient en somme à le *diviser* par une longueur, pour avoir une résistance. Réciproquement, une résistance spécifique correspond à une *résistance multipliée* par une longueur. C'est pourquoi on l'exprime en *ohms-centimètres*, l'unité de longueur employée en électricité étant le centimètre, comme nous l'allons voir tout à l'heure.

Voilà, direz-vous, un « charabia » bien subtil! Possible, mais quand vous saurez que dans certain milieu électrique vous vous feriez... écharper en évaluant les résistances spécifiques en ohms, vous y regarderez peut-être à deux fois avant de vous désintéresser de la question. Et vous aurez raison.

Voici, à ce sujet, les résistances spécifiques de quelques substances usuelles :

NOMS DES CORPS	RÉSISTANCE SPÉCIFIQUE en ohms cm	NOMS DES CORPS	RÉSISTANCE SPÉCIFIQUE en ohms cm
Argent recuit.....	0,000001493	Plomb comprimé.....	0,000019465
Cuivre recuit.....	0,000001584	Mercure liquide.....	0,000094340
Or écroui.....	0,000002077	Solution de sulfate de cuivre saturée.....	29
Zinc comprimé.....	0,000005580		
Platine recuit.....	0,000008981		
Fer recuit.....	0,000009636		

Et voici maintenant pour vous prouver que tout ceci sert à quelque chose, ce dont vous n'êtes peut-être pas encore persuadé :

1° Trouver la résistance d'un fil de cuivre de 2 millimètres carrés de section et de 30 mètres de longueur. Il faut, dans la formule $R = \frac{\alpha l}{s}$, faire $\alpha = 0,000001584$ ohm-cm., $l = 30.000$ cm., $s = 0,02$ cm²

$$\text{D'où : } R = \frac{0,000001584 \times 3.000}{0,02} = 0,2376 \text{ ohm.}$$

2° Quelle est la section d'un fil de fer qui, ayant 23 mètres de long, présente une résistance de 1 ohm ? Il faut d'abord remarquer que la formule $R = \frac{\alpha l}{s}$ montre que R étant le quotient du dividende αl par le diviseur s , on doit avoir $R s = \alpha l$, ou bien encore $s = \frac{\alpha l}{R}$, car dans cette dernière équation, le produit du diviseur R par le quotient s est bien égal au dividende αl . Or, cette relation $s = \frac{\alpha l}{R}$ est très commode dans notre cas, puisque c'est s que nous cherchons. On prendra donc $\alpha = 0,000009636$ ohm-cm., $l = 2.300$ cm, $R = 1$ ohm et on aura s en centimètres carrés, soit

$$s = \frac{0,000009636 \times 2.300}{1} = 0,0222 \text{ cm}^2$$

soit un peu plus de 2 millimètres carrés.

3° Quelle est la longueur d'un fil d'argent de 0,2 mm² de section présentant une résistance de 5 ohms ? Par des considérations analogues aux précédentes, on mettra l'équation de la résistance sous la forme $l = \frac{R s}{\alpha}$, puisque c'est l qu'on cherche,

et on en déduira $l = 6.700$ centimètres ou 67 mètres. Attention, dans le calcul, à bien exprimer s en centimètres carrés !

MULTIPLES ET SOUS-MULTIPLES

Système C. G. S.

Au moment où nous allons quitter avec soulagement cet ennuyeux chapitre des résistances, je m'aperçois qu'il me reste encore quelque chose à dire.

Nous venons de voir que les résistances spécifiques des métaux étaient exprimées par des fractions très petites d'ohm-centimètre. Par contre, les résistances spécifiques des corps mauvais conducteurs, ou *isolants*, verre, caoutchouc, gutta-percha, etc., se chiffrent souvent par des milliards et des trillions d'ohms-centimètres. Or, vous me croirez sans doute quand je vous dirai que cela n'a rien d'intéressant de trainer dans les calculs ni même dans le langage des ribambelles de zéros, qu'ils soient d'ailleurs à droite ou à gauche de la virgule.

On a donc été amené en électricité, comme dans le système métrique usuel, à créer des multiples et des sous-multiples des unités pratiques, lesquels sont représentés par des préfixes d'origine latine ou grecque, précédant le nom de l'unité considérée. Vous apprendrez d'ailleurs avec satisfaction que ces préfixes, vous les connaissez déjà, car ils sont les mêmes que pour le système métrique, sauf quelques nouveaux que l'on a dû créer pour satisfaire aux besoins plus étendus de l'électricité.

Voici pour les multiples :

Déca, signifie 10. Peu usité en électricité.

Hecto, 100. Ainsi, hectowatt 100 watts, le *watt* étant l'unité de *puissance*, dont nous parlerons bientôt. Ainsi encore, hectowatt-heure.

Kilo, 1.000 : Ainsi, kilovolt, 1.000 volts, employé surtout pour évaluer le potentiel des machines statiques ; kilowatt, ou 1.000 watts.

Myria, 10.000 : Peu usité en électricité.

Méga ou *még*, 1.000.000 : Ainsi, 1 mégohm veut dire 1 million d'ohms.

Voici maintenant pour les sous-multiples :

Déci ou $\frac{1}{10}$: déci ampère.

Centi ou $\frac{1}{100}$: centi ampère.

Milli ou $\frac{1}{1.000}$: milli ampère, millivolt.

Micro ou $\frac{1}{1.000.000}$: microampère, microvolt, microhm, microhm-centimètre, microcoulomb, etc...

Et alors, au lieu d'écrire que la résistance spécifique du cuivre est de 0,0000016 ohm-centimètre, nous écrirons 1,6 microhm-cm.

Mais prenez-y garde ! cette commodité plus grande de l'emploi des multiples et sous-multiples a sa contre-partie fâcheuse.

Par exemple, il faut remarquer que si on y exprime α en microhms-cm., la formule $R = \frac{\alpha l}{s}$ donnera à son tour des résistances en microhms, et il ne faudra pas oublier de diviser les résultats par 1 million pour les avoir en ohms.

Des corrections semblables sont nécessaires chaque fois qu'on se sert des multiples, de sorte qu'une attention assez grande est indispensable.

Ce qui précède a l'avantage de nous donner de précieuses indications sur la génération de ces mots à l'aspect rébarbatif que l'on rencontre si souvent en électricité : ainsi le *microcoulomb*, nom à faire trembler les petits enfants, résulte de la juxtaposition de deux mots très simples : *micro*, préfixe qu'on rencontre sans s'en étonner dans beaucoup de mots du langage usuel où il signifie petit : microscope, micromètre, etc., et *coulomb*, nom d'un physicien français. De même pour kilowatt, mégohm, microvolt, etc. Tous ces noms sont de la plus entière logique.

Quant aux unités principales elles-mêmes, celles que, dans un esprit très large, on a décidé de baptiser du nom des plus illustres pionniers de l'électricité sans s'attarder à de mesquines considérations de nationalités, il ne faudrait pas croire non plus qu'elles ont été choisies au hasard, comme par exemple la livre tournois, la perche ou la toise aux siècles passés, comme actuellement encore les unités bizarres

que l'Angleterre s'entête à conserver — par respect sans doute pour leur antiquité.

Ainsi nous avons déjà vu que la valeur de l'ampère était déterminée par celle du coulomb, que la valeur de l'ohm était fixée par celle du volt et de l'ampère. Mais la valeur du coulomb et du volt eux-mêmes, ainsi que de *toutes* les unités électriques, dépendent de trois unités fondamentales : le **centimètre**, la masse du **gramme** et la **seconde**. Ces trois grandeurs fondamentales et les différentes grandeurs électriques sont reliées par une série de relations dont l'ensemble constitue le système *C. G. S.*, abréviation de système centimètre, gramme, seconde.

Nous ne pouvons pas — ayant bien d'autres choses à voir, — entrer plus avant dans cette question. Il vous suffira, pour vous douter de la valeur et de la commodité de ce système, de savoir qu'il est adopté, sans distinction d'origine, par les électriciens du monde entier : un électricien allemand, américain, voire même japonais — car l'électricien japonais commence à pulluler sur le marché — sait aussi bien qu'un Français ce que veut dire un ampère. C'est évidemment là un avantage extrêmement précieux pour les relations de pays à pays, et les électriciens sont à bon droit très fiers d'un internationalisme scientifique dont ils sont encore les seuls à donner l'exemple.

RÉSUMÉ

Les conducteurs électriques, de même que les tuyaux pour les liquides, opposent au passage du courant électrique une *résistance* d'autant plus grande que leur *longueur* est plus grande et leur *section* plus petite. Cette résistance dépend aussi beaucoup de la *nature* du conducteur, les différents conducteurs étant très différemment perméables au courant. La résistance se mesure et s'exprime en *ohms*, l'ohm étant représenté par la résistance d'un conducteur qui, soumis à une diff. de pot. de 1 volt, se laisse traverser par un courant de 1 ampère.

Dans un système conducteur parcouru par un courant, la diff. de pot. agissante, la résistance du système et le courant

produit sont liés par la loi de Ohm $I = \frac{E}{R}$, qui permet de trouver un quelconque des trois facteurs quand les deux autres sont connus.

Au point de vue quantitatif, la résistance des conducteurs cylindriques est proportionnelle à leur longueur et inversement proportionnelle à leur section. Cette résistance est, en outre, proportionnelle à un certain coefficient α , variable avec chaque substance, qui est la *résistance spécifique* de cette substance et s'exprime en *ohms-centimètres*.

Pour ne pas avoir à traîner dans les calculs de trop grands nombres, on fait souvent usage de multiples et sous-multiples des différentes unités électriques. Ces multiples et sous-multiples sont les mêmes que ceux employés dans le système métrique, à l'exception de quelques nouveaux, *méga* ou *még.* qui signifie un million, *micro*, qui signifie un millionième. Quant aux unités électriques elles-mêmes, elles n'ont pas été choisies au hasard, mais à la suite de laborieuses considérations d'où est sorti le système C. G. S. ou système basé sur le centimètre, la masse du gramme et la seconde.

CHAPITRE CINQUIÈME

PUISSANCE

Élargissons maintenant notre horizon... hydraulique jusqu'à la conception d'une chute d'eau déversant son flot dans quelque vallon, en une courbe gracieuse de quelques mètres de hauteur.

Que nous dit cette chute? Cela dépend.

Que le paysage soit superbe, que cette chute y fasse le plus ravissant effet avec la poussière liquide que le soleil irise, l'écume qui file parmi les roches au gré du torrent, le bouquet d'arbres qui se penche..., que le plaisir des yeux y soit à souhait complété par celui des oreilles, cela, oui, nous pourrions en convenir, pour ne pas nous mettre à couteaux tirés avec messieurs les artistes et messieurs les poètes, gens de fort mauvais caractère quand on s'avise de les contredire.

Mais au fond, nous n'en avons cure.

Nous autres, électriciens, êtres positifs sur lesquels les charmes de la nature ne peuvent avoir de prise, cette chute nous intéresse aussi, certes! mais c'est pour une tout autre raison. Quitte à porter dessus une main sacrilège, nous voudrions bien en tirer quelque chose! Mais quoi? Tout simplement un peu de cette *énergie* qui donne le souffle à nos machines, qui est la cause de toute vie, de tout mouvement. Seulement, pourrions-nous tirer de cette chute suffisamment de cette précieuse énergie? le jeu vaudra-t-il la chandelle de nous brouiller à mort avec artistes et poètes de tout à l'heure en leur gâtant définitivement leur cher paysage?

Pour cela, il faudra d'abord que nous connaissions la *puissance* de cette chute, ou, pour parler terre-à-terre, le nombre de chevaux qu'elle est capable de développer.

Qu'est-ce que c'est encore que cette grandeur, que nous

n'avons pas rencontrée jusqu'ici dans nos bavardages hydraulico-électriques ?

Car nous n'avons parlé que de la différence de niveau en vertu de laquelle se produit un écoulement liquide, et que du débit de cet écoulement.

Or, la puissance d'une chute ne dépend pas exclusive-



Fig. 26 — Chute de grande hauteur, mais de faible débit: faible puissance.

ment de la différence de niveau, c'est-à-dire de sa hauteur, car une chute même très haute sera très faible si elle ne débite que quelques litres par seconde (fig. 26) ;

Elle ne dépend pas non plus que du débit, car une chute même très abondante sera de faible puissance si sa hauteur n'est que de quelques centimètres (fig. 27).

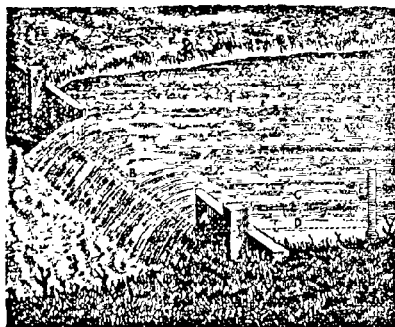


Fig. 27. — Chute de grand débit, mais de faible hauteur : faible puissance.

Pour qu'une chute soit puissante (fig. 28), il lui faut donc à la fois grande hauteur et grand débit, et sa puissance

s'évalue en faisant *le produit* de ces deux quantités : Si on exprime la hauteur en mètres, le débit en litres (ou kilogrammes) par seconde, le produit obtenu donne la mesure de la puissance de la chute en *kilogrammètres par seconde* ; et comme un *cheval-vapeur* est égal à 75 kilogrammètres par seconde, il suffit de diviser par 75 le précédent résultat pour obtenir en chevaux la puissance théorique de la chute. Quant au *travail*, à l'*énergie* produite par la chute en un certain temps, elle est égale au produit de la puissance par ce temps et s'exprime en *chevaux-heures*, car il est évident qu'en 2 heures, qu'en 3 heures, la chute effectuera 2, 3 fois plus de travail qu'en une heure.

Si donc la chute est assez puissante pour le but désiré, nous ne nous ferons aucun scrupule pour mettre la main dessus. Tant pis pour les poètes ! Et c'est ainsi qu'en notre époque utilitaire, nombre de chutes grandioses ont été « domestiquées » à la grande indignation des touristes ; c'est ainsi qu'un jour viendra où la cataracte du Niagara tout entière s'écoulera par de gigantesques tuyaux pour le plus grand profit de l'industrie.

Les principes bien connus qui précèdent sont exactement applicables en électricité. Un courant électrique ne peut traverser un conducteur qu'en surmontant sa résistance, et cela parce qu'il se *développe* dans la source, dans le générateur d'électricité une certaine *puissance électrique*, laquelle se *dépense* dans le conducteur sous forme de chaleur.

Puissance et énergie fournies par une source d'électricité.

— Le générateur électrique, c'est donc pour nous l'équivalent de la source qui alimente une chute d'eau. Pour que ce générateur soit puissant, il faudra à la fois qu'il corresponde électriquement à une grande hauteur de chute, c'est-à-dire qu'il possède une grande force électromotrice, et qu'il puisse débiter beaucoup. Et, comme dans le cas de la chute d'eau, sa puissance s'évaluera en faisant le produit de sa f. é. m. exprimée en volts par l'intensité du courant qu'il peut débiter exprimée en ampères. Le produit de ces deux nombres ne s'exprime pas en volts-ampères, ce serait trop long — car, en électricité plus qu'ailleurs, *time is money* — on l'exprime en

watts, du nom du célèbre mécanicien anglais auquel la machine à vapeur est redevable de ses plus importants perfectionnements.

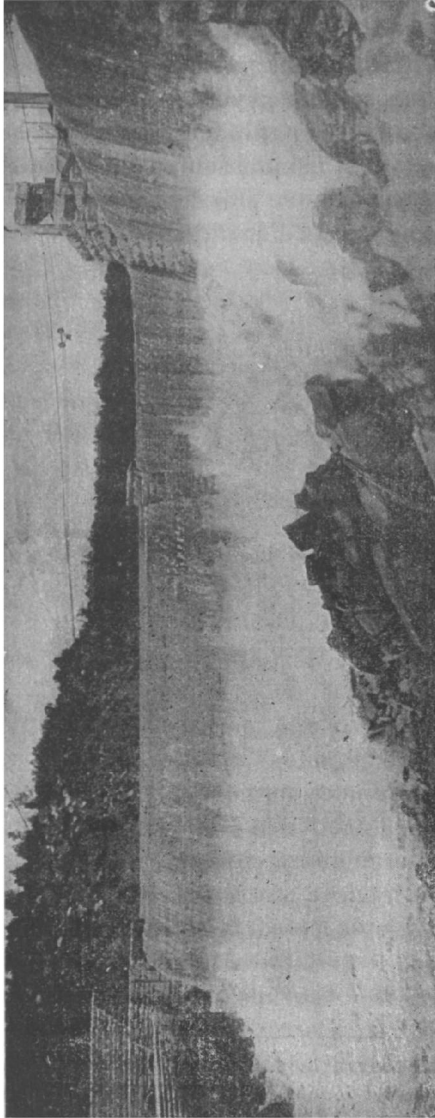


Fig 28. — Chute de Folsom (Californie) partiellement utilisée pour la production de l'énergie électrique.
A la fois grande hauteur et grand débit: grande puissance.

Ainsi, une pile dont la f. é. m. est de 2,5 volts et qui débite 5 ampères développe une puissance de 12,5 watts.

Comme les puissances mécanique et électrique sont facilement transformables l'une dans l'autre à l'aide soit de la dynamo, soit du moteur électrique, il est important de savoir que 10 watts équivalent à peu près à 1 kilogrammètre par seconde, et 736 watts à un cheval vapeur (1).

Quant au *travail*, quant à l'*énergie* fournie par la source en un certain temps, comme celle d'une chute, elle est égale au produit de la puissance par le temps considéré et s'exprime en *watts-heures*(2). Ainsi une source qui fournit 10 ampères sous 20 volts développe une puissance de 200 watts et produit en 5 heures une quantité d'énergie de 200×5 ou 1.000 watts-heures ou 1 *kilowatt-heure* ou encore $\frac{1.000}{736} = 1,36$ cheval-heure, car un cheval étant égal à 736 watts, un cheval-heure équivaut à 736 watts-heures.

Nous venons donc de voir que

$$P \text{ en watts} = E \text{ en volts} \times I \text{ en ampères}$$

$$\text{ou } P = EI \text{ (}^1\text{)}.$$

Faisons dans cette équation $E = 1$ volt, $I = 1$ ampère.

Nous avons alors $P = 1$ volt \times 1 ampère = 1 watt. Cela veut dire que le watt, ou unité de puissance, est la puissance développée quand une source fournit un courant de 1 ampère sous la *pression*, sous la f. é. m. de 1 volt.

Puissance et énergie absorbées par un circuit. — Les considérations précédentes s'appliquent non seulement à la puissance *fournie* par une source d'électricité, mais à la puissance *absorbée* dans une résistance. Ainsi, un courant de 1 ampère qui parcourt un conducteur *peu résistant*, sous l'effet, par suite, d'une faible diff. de pot., a moins de *mérite*, correspond à une moindre puissance qu'un autre courant de 1 ampère qui traverse un conducteur *très résistant* sous l'effort d'une diff. de pot. très élevée. Comme pour la puissance *fournie*, il faut faire intervenir pour la puissance *dépensée* le *produit* des volts absorbés par les ampères pro-

(1) On exprime souvent la puissance des dynamos en *kilowatts* (1.000 watts). Le kilowatt est donc une unité un peu plus grande que le cheval : exactement, 1 kilowatt = 1,36 cheval.

(2) L'unité pratique C. G. S. d'énergie est le **Joule** ou *watt-seconde* qui est beaucoup trop petit pour être employé fréquemment.

duits. Nous pouvons donc dire encore que le watt est la puissance dépensée dans un conducteur traversé par un courant de 1 ampère sous l'effet d'une diff. de pot. de 1 volt. Ainsi, une lampe à incandescence alimentée par un courant de 0,5 ampère sous 100 volts absorbe une puissance de 50 watts.

Cette relation constante entre puissance, diff. de pot. et intensité nous permet de résoudre différents problèmes.

D'abord, cette relation $P = E I$ peut subir des transformations analogues à celles que nous avons fait subir à la relation établie par Ohm (page 44) : La puissance P , étant égale au produit de E par I , peut être considérée comme le dividende d'une division dont I est le diviseur et E le quotient de sorte que

$$E = \frac{P}{I} \quad (2)$$

Nous pouvons dire aussi que P peut être considéré comme le dividende d'une division dont E est le diviseur et I le quotient, de sorte que

$$I = \frac{P}{E} \quad (3)$$

Ces trois formes d'exprimer une même loi ont chacune leur utilité spéciale.

La première forme, $P = E I$, veut dire que si une diff. de pot. ou une f. é. m. E produit dans un système conducteur une intensité I , la puissance électrique qui est dépensée dans ce système est égale au produit $E I$.

Si par exemple, je sais qu'un conducteur, soumis à une différence de potentiel de 10 volts, est traversé par un courant de 2 ampères, j'en conclus qu'il s'y dépense $10 \times 2 = 20$ watts.

La deuxième forme, $E = \frac{P}{I}$, signifie que, si dans un système, le passage d'une certaine intensité I nécessite une certaine puissance P , c'est que cette intensité circule sous l'effet d'une différence de potentiel égale à $\frac{P}{I}$

Par exemple, si dans notre conducteur de tout à l'heure je sais qu'il passe 2 ampères et que la puissance absorbée est 20 watts, j'en conclus que la différence de potentiel agissante est $E = \frac{20}{2} = 10$ volts.

Enfin, la troisième forme, $I = \frac{P}{E}$, nous dit qu'un système conducteur soumis à E volts et dans lequel la puissance développée est P watts, est traversé par $\frac{P}{E}$ ampères. Si, par exemple, $P = 20$ watts, $E = 10$ volts, c'est que $I = \frac{20}{10} = 2$ ampères.

En somme, si l'on connaît deux quelconques des trois facteurs P , I , E , qui interviennent dans un système conducteur, on peut toujours trouver le troisième. Si c'est P qu'on ne connaît pas, on prendra la première forme de l'équation; si c'est E , on s'adressera à la seconde; on utilisera enfin la troisième forme si, P et E étant connus, c'est I qu'on cherche.

Exemple : 1° Quelle puissance est absorbée dans une lampe soumise à 50 volts et traversée par 1,5 ampère? Réponse, 75 watts. 2° Quelle différence de potentiel existe aux bornes d'un fil traversé par 0,5 ampère et absorbant 18 watts? Réponse, 36 volts. 3° Quel courant traverse une lampe à incandescence absorbant 50 watts sous 110 volts? Réponse, 0,45 ampère.

Nous pourrions maintenant observer que, d'après la loi de Ohm, E étant égal à RI (p. 45), notre équation

$$P = EI$$

peut devenir

$$P = RI^2$$

Nous pourrions donc recommencer sur cette équation et ses modifications des calculs analogues aux précédents. Mais nous laisserons à nos lecteurs ce soin, en leur répétant que cela leur sera très utile; car c'est souvent, par la suite, que nous aurons besoin d'exprimer la puissance dépensée dans un conducteur sous la forme RI^2 .

CIRCUIT ÉLECTRIQUE

Reprenons nos deux vases communiquants (fig. 29). Depuis le temps que nous les interrogeons, il y a des chances pour que plus d'un coup, le vase A se soit tari. Pour continuer à en tirer des renseignements, il a fallu, chaque fois que cet accident s'est produit, que nous reprenions l'eau dans B et que nous la remontions dans A.

Or, ce remontage, c'est aux dépens de nos muscles, c'est aux dépens de notre *énergie* qu'il se fait. Et il faut bien qu'il

en soit ainsi, puisque de l'énergie aussi se dépense dans l'écoulement liquide sous forme de mouvement, de frottements : Où le système prendrait-il le mouvement, l'énergie qu'il met en jeu si nous ne lui en fournissions pas, au moins de temps en temps ?

Il est donc nécessaire, pour avoir un écoulement continu, que notre système de vases communicants soit complété par un pourvoyeur d'énergie extérieure capable de remonter le liquide. Nous pourrions, par exemple, charger de ce soin une pompe que nos muscles feront mouvoir (fig. 30). Et alors, il deviendra évident que pour que le phénomène soit continu, il faut que le liquide parcoure *un cycle complet* dans l'une des parties duquel (pompe) de l'énergie sera cédée au liquide par le fait de son élévation, et dans une autre partie duquel (tuyau)

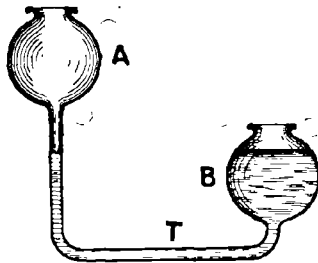


Fig. 29. — Quand A se tarit, il faut remonter le liquide de B dans A ; on fournit pendant cette opération l'énergie qui apparaît lors de la circulation du liquide.

cette énergie réapparaîtra soit sous forme de frottement, ou bien, par exemple, en mettant en mouvement une minuscule turbine.

Il en est de même en électricité. Nous savons qu'entre les deux pôles d'une pile existe une différence de niveau électrique capable de produire un écoulement dans un conducteur. Mais pourquoi cet écoulement ne se tarit-il pas aussitôt ? Parce que l'action chimique est, comme nos muscles, une source d'énergie, et que la dissolution du zinc engage à chaque instant sous forme électrique de nouvelles quantités de cette énergie, qui sont occupées à *maintenir* la différence de niveau en dépit de l'écoulement (fig. 31). Ainsi, nous pouvons nous figurer que la dissolution du zinc équivaut à la manœuvre de notre pompe de tout à l'heure, et que l'énergie qu'elle met

en jeu fait *remonter* du pôle négatif au pôle positif la quantité d'électricité que le conducteur *descend* à chaque instant du pôle positif à ce pôle négatif.

Et de cette façon, nous sommes conduits à admettre que la circulation électrique ne se limite pas au conducteur reliant les deux pôles, mais continue dans la pile elle-même (fig. 32), dans laquelle elle se dirige du pôle — vers le pôle +.

Le cycle est donc complet. Et ce *circuit électrique* est alors caractérisé en une de ses parties (générateur) par une dépense continuelle d'énergie sous forme d'action chimique,

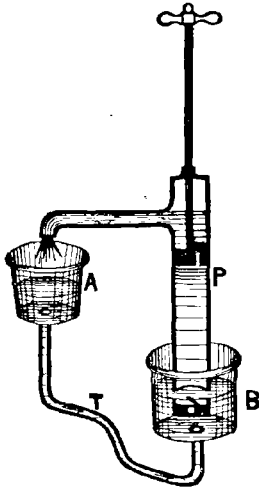


Fig. 30. — L'énergie dépensée pour manœuvrer la pompe maintient la différence de niveau entre les deux vases malgré le débit.

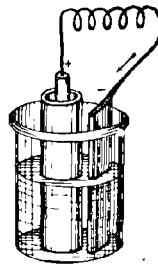


Fig. 31. — L'énergie dépensée sous forme d'action chimique dans la pile maintient la différence de potentiel entre les deux pôles malgré le débit.

énergie qui réapparaît dans l'autre partie du circuit (conducteur) sous forme d'échauffement, de lumière, d'effets physiologiques ou chimiques, etc., dont nous pouvons tirer parti.

Tout ce que nous venons de dire s'appliquerait identiquement aux autres sources d'électricité, à cela près que dans les dynamos, ce n'est plus de l'énergie *chimique* mais de l'énergie *mécanique* qui est absorbée sous forme électrique; que dans les piles thermo-électriques, c'est de l'énergie *calorifique* qui entre en jeu; de l'énergie *lumineuse* enfin dans les piles actino-électriques.

Constatons enfin que voici encore justifiées certaines expressions rencontrées en cours de route, comme celles de *circuit ouvert*, de *circuit fermé*, etc.

. Petit à petit, notre programme se corse.

RÉSISTANCE INTÉRIEURE

Si, de par notre nouvelle conception du circuit électrique, nous avons été conduits à voir que le courant circule non seulement dans le conducteur, mais aussi à travers la pile, nous devons bien penser que dans cette partie du circuit aussi une certaine résistance s'oppose à son passage.

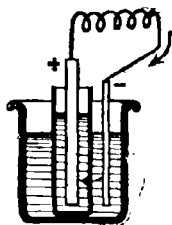


Fig. 32. — Le courant électrique circule non-seulement dans le conducteur extérieur, mais aussi dans la pile, parcourant ainsi un circuit fermé.

Il y a même d'autant plus de probabilités pour cela que le courant doit franchir entre les électrodes un certain intervalle liquide, et les liquides ont la réputation, sauf le mercure, liquide si bizarre que ce n'en est pour ainsi dire pas un, d'être toujours infiniment moins bons conducteurs que les métaux : Ainsi, la résistance spécifique de l'eau acidulée sulfurique est voisine de 1 ohm-centimètre, soit environ *six cent mille fois* celle du cuivre.

Effectivement, la *résistance intérieure* des piles — c'est le nom qu'on lui donne — est toujours assez grande. Il ne faut donc pas la négliger quand on considère la *résistance totale* d'un

circuit électrique, qui est la somme de la résistance extérieure R et de la résistance intérieure r . Nous lui sommes même, comme vous l'allez voir, redevables de toutes sortes d'ennuis.

D'abord, c'est à cette résistance intérieure qu'est dû le phénomène très important et déjà plusieurs fois signalé de l'*abaissement de la diff. de pot. aux bornes* d'une pile quand on ferme celle-ci sur un conducteur.

Une comparaison hydraulique va encore nous donner la clef de ce phénomène.

Soient deux vases V et V' (fig. 33) remplis de liquide à des niveaux différents et pouvant communiquer l'un avec l'autre par un tuyau T muni d'un robinet R . Dans le vase inférieur est une pompe P qui, actionnée, peut remonter le liquide

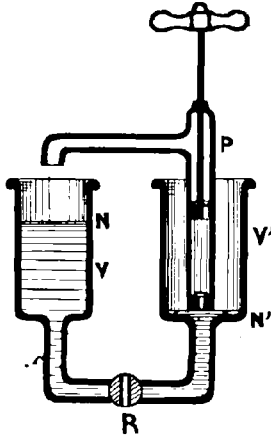


Fig. 33.

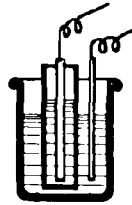


Fig. 34.

Fig. 33. — Lorsque T ne débite pas, la différence de niveau entre N et N' est aussi grande que possible.

Fig. 34. — Lorsque la pile ne débite pas, la différence de potentiel entre les deux pôles est aussi grande que possible : f. é. m.

dans V jusqu'au niveau N , mais non plus haut, pour la bonne raison qu'à ce moment le liquide de V' est épuisé. Comme nous l'avons déjà dit, cette pompe qui fournit au système l'énergie destinée à remonter le liquide et à perpétuer l'écoulement, est l'équivalent de notre pile; le frottement que le liquide y rencontre est l'équivalent de la résistance intérieure: une grosse pompe, pouvant débiter beaucoup, correspond à une faible résistance intérieure et réciproquement.

Lorsque le tuyau T est fermé, la pompe a amené dans V le

liquide à son niveau supérieur N : la différence de niveau entre V et V' est aussi grande que possible :

Elle correspond à la *f. é. m.* de la pile au repos (fig. 34).

Ouvrons le robinet R (fig. 35), ce qui, par une singularité de langage, équivaut à *fermer* le circuit de la pile.

Le niveau tend à baisser dans V , à monter dans V' . Mais en même temps, la pompe se met à fonctionner, puisque sa partie inférieure replonge dans le liquide. Alors, de deux choses l'une : ou le tuyau T est long et étroit et la pompe capable d'un grand débit (faible résistance intérieure, grande résistance extérieure) ; dans ce cas, le liquide qui s'écoule est presque immédiatement remplacé dans V par le jeu de la pompe et le niveau *baisse assez peu* ; ou T est gros comparativement à la pompe (grande résistance intérieure, faible résistance extérieure), et alors celle-ci ne suffit plus à combattre l'écoulement par T , de sorte que le niveau baisse jusqu'à un certain équilibre.

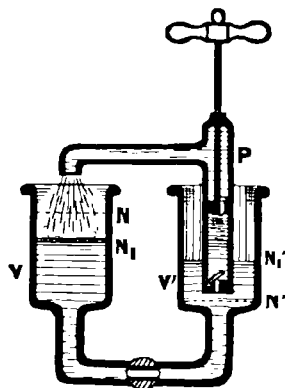


Fig. 35. R

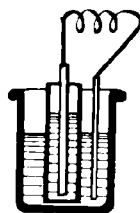


Fig. 36.

Fig. 35. — Lorsque R est ouvert, la différence de niveau NN' diminue malgré le fonctionnement de la pompe, et d'autant plus que le débit de T est plus grand.

Fig. 36. — Dès que la pile débite, la différence de potentiel aux bornes devient plus petite que la *f. é. m.*, et diminue d'autant plus que le débit est plus grand.

Si même T est très gros, la différence de niveau peut tomber à une valeur très faible.

Appliquons textuellement ces observations à la pile : tant que la pile est à circuit ouvert (fig. 34), la diff. de pot. aux bornes est maintenue par l'action chimique à sa valeur maxima, que nous avons appelée force électromotrice.

Mais, dès que nous *fermons* la pile sur une résistance

extérieure (fig. 36), la différence de pot. aux bornes tombe aussitôt, une partie de la f. é. m. étant absorbée par le frottement du courant produit dans la résistance intérieure. Plus la résistance extérieure est faible par rapport à la résistance intérieure, plus le courant est intense et plus le frottement interne est grand ; donc plus la baisse de potentiel est accentuée. Si le conducteur est gros et court, l'action chimique ne pourra plus *pomper* assez vite pour maintenir une différence de niveau : toute la f. é. m. sera absorbée dans la pile et la diff. de pot. aux bornes tombera à zéro. On a une expression imagée pour exprimer cela : On dit que la pile est en *court-circuit*.

Par conséquent, vous êtes averti : si vous trouvez un jour que la diff. de pot. aux bornes d'un de vos éléments de pile est nulle, il y aura beaucoup de chance pour que cela provienne d'un court-circuit inaperçu, provoqué accidentellement par le contact de deux fils ou des deux électrodes. Dépê-

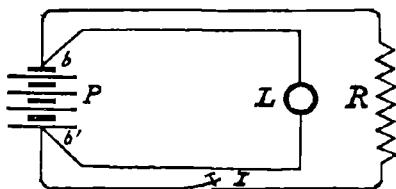


Fig. 37. — Quand on ferme l'interrupteur I, l'éclat de la lampe diminue; c'est un effet de la résistance intérieure de la pile.

chez-vous alors de remédier à l'accident, car nous venons de le voir, c'est quand une pile est en court-circuit qu'elle débite et s'abîme le plus.

Les conclusions auxquelles nous venons d'arriver sont très importantes. Il est intéressant d'essayer de les vérifier par une expérience.

Supposons donc que, définitivement écœuré de votre méchante pile Volta du début, vous vous êtes construit ou procuré quelques piles au bichromate semblables à celles que nous avons décrites. Supposons aussi, pendant que nous y sommes, que vous sachiez — et cela ne tardera plus — les réunir, les *coupler* entre elles de manière à combiner leurs

effets et à pouvoir, avec la *batterie* ainsi constituée, représentée sur la figure 37 par l'assemblage P, alimenter une petite lampe à incandescence L. Des bornes *b* et *b'* de la batterie partent non seulement les fils d'alimentation de la lampe, mais encore deux autres fils constituant un second circuit R peu résistant et que nous pouvons ouvrir ou fermer à volonté en manœuvrant l'interrupteur I. Lorsque l'interrupteur est ouvert, la lampe fonctionne normalement; dès qu'on abaisse la manette de l'interrupteur, la lampe s'éteint presque : la pile ayant à alimenter à la fois les deux circuits, son débit s'est accru, et le frottement interne a subi une augmentation dont la diff. de pot. aux bornes a dû payer les frais. Dès qu'on lâche l'interrupteur, le fonctionnement de la lampe redevient normal.

PUISSANCE UTILE, PUISSANCE PERDUE

Où je me trompe fort, ou mes lecteurs se demandent comment il se fait que depuis si longtemps je n'ai pas fait intervenir dans tous ces beaux raisonnements quelques bonnes petites équations.

Pour peu qu'ils y tiennent...

Puisque la résistance totale d'un circuit comprenant une source d'électricité *r* débitant à travers un conducteur extérieur *R* est $R + r$, la loi de Ohm $I = \frac{E}{R+r}$, mise sous sa seconde forme (voyez page 44), nous indique que la f. é. m.

$$E = (R + r) I = RI + rI$$

Cela veut dire que si par exemple une pile dont la résistance intérieure $r = 0,5$ ohm débite sur une résistance extérieure $R = 2$ ohms un courant $I = 0,8$ ampère, c'est que sa f. é. m. *E* est égale à $2 \times 0,8 + 0,5 \times 0,8 = 2$ volts.

Mais cela veut dire aussi quelque chose de beaucoup plus général, car l'équation que nous venons de poser a toute une portée philosophique que vous ne seriez peut-être pas tenté de lui attribuer.

Si en effet nos commentaires sont encore présents à votre esprit, vous savez que la résistance *R* traversée par un courant *I* absorbe *RI* volts (page 44), et que la résistance

intérieure r , traversée par ce même courant, absorbe de son côté rI volts. L'équation précédente indique que la somme $RI + rI$ de ces deux diff. de pot. absorbées dans les deux parties du circuit est précisément égale à la force électro motrice E de la source.

Remarquons maintenant que si dans la pile nous fabriquons une diff. de pot. totale E , mais que dans cette même pile nous en absorbons pour la circulation du courant une partie rI , il ne pourra plus apparaître aux bornes de la pile que *ce qui reste*, c'est-à-dire $E - rI$. C'est là ce que nous avons appelé la diff. de pot. aux bornes, qu'on représente généralement par e ; comme on a vu que $E = RI + rI$, il s'en suit que notre diff. de pot. aux bornes $E - rI$ ou e , qui peut s'écrire $RI + rI - rI$, est précisément égale à RI , c'est-à-dire à ce qui est absorbé dans le circuit extérieur : c'est logique, car le circuit extérieur ne peut prendre que ce qu'on lui laisse, c'est-à-dire la diff. de pot. aux bornes.

Quant à rI , c'est ce que nous savons appelé la chute de potentiel quand la pile débite.

Nous retrouvons dès lors deux choses que nous avons devinées tout à l'heure.

D'abord, cette chute de potentiel rI sera d'autant plus accentuée que la résistance intérieure r sera plus grande.

D'autre part, elle le sera aussi d'autant plus que l'autre facteur I sera plus grand, c'est-à-dire qu'on fera débiter la pile sur une résistance extérieure plus faible.

A la limite, lorsqu'on réunira les deux pôles par un conducteur sans résistance appréciable (*court-circuit*, $R = 0$), la relation $E = RI + rI$ se réduira à $E = rI$: I sera alors tellement grand que la perte rI dans la résistance intérieure deviendra égale à la totalité E de la f. é. m. La diff. de pot. aux bornes tombera donc à zéro.

C'est ce que notre comparaison hydraulique nous avait fait deviner.

La perte de potentiel dans un générateur qui débite n'est pas, on le conçoit, sans inconvénients.

D'abord, la différence de potentiel *utile*, celle qui existe entre les bornes de la pile et qui agit effectivement sur le conducteur est diminuée d'autant : Un générateur qui débite se trouve exactement dans les mêmes conditions qu'une chute d'eau dont *une partie* seulement de la hauteur serait utilisée; la puissance *totale* développée par cette chute est bien égale au produit du débit par la hauteur totale, mais la puissance *utile* est seulement égale au produit du débit par la hauteur réellement utilisée.

De même, tandis que la puissance *totale* d'une pile est égale, comme nous l'avons dit, à sa force électromotrice totale E multipliée par son débit I , soit EI , la puissance *utile* est seulement eI , en appelant e la diff. de pot. aux bornes. Quant à la différence entre la puissance totale et la puissance utile, soit $(EI - eI)$ ou $(E - e)I$, c'est la puissance *perdue* dans la pile sous forme d'échauffement pour vaincre la résistance intérieure.

Nous pouvons remarquer d'ailleurs que $E - e$, différence entre la f. é. m. et ce qui apparaît aux bornes, n'est autre chose que la chute de potentiel dans la pile, et nous avons dit (page précédente), que cette chute est égale à rI .

La puissance perdue dans la pile, $(E - e)I$, peut donc aussi s'écrire $rI \times I$ ou rI^2 .

On voit donc que si la pile est susceptible de nous fournir une certaine puissance, nous en perdons inutilement, sous forme d'échauffement du liquide, une portion rI^2 d'autant plus grande que la résistance intérieure r est plus grande.

Or, première pierre dans le jardin de cette pauvre résistance intérieure, cette perte n'a rien d'agréable, car on sait ce que coûte l'énergie produite par les piles quand on en a usé pendant quelques années!

Ensuite, chose peut-être plus grave encore, la plus petite variation de débit d'une pile ou d'une batterie à grande rés. intérieure fait varier beaucoup la perte; elle provoque donc des variations de différence de potentiel aux bornes considérables, dont notre expérience de tout à l'heure (fig. 37) nous a montré les inconvénients.

On ne peut plus, par exemple, allumer une seule lampe sans faire *baisser* toutes celles qui fonctionnent déjà. En

un mot, les divers appareils alimentés par une telle source sont dans la plus lamentable dépendance les uns des autres. On conçoit combien pareille chose serait grave pour une usine d'éclairage électrique, puisque sur un réseau d'éclairage, le nombre de lampes allumées variant constamment, c'est à chaque instant que se produisent les variations de débit. Heureusement, la résistance intérieure des machines dynamos qui alimentent les circuits des stations centrales, est très faible à côté de celle des piles, et cet effet se trouve par cela même presque éliminé.

La résistance intérieure est donc un défaut, un défaut que ne... dépare aucune qualité.

Comme toute chose franchement mauvaise, il faut s'attacher sinon à l'éliminer complètement, ce qui est impossible, tout au moins à la rendre aussi petite qu'on le peut. Que faut-il faire pour cela, du moins dans les piles? Il est aisé de s'en rendre compte

Cette résistance intérieure, nous l'avons dit, provient du passage du courant à travers la tranche liquide qui sépare les deux électrodes : cette tranche se comporte comme un conducteur, de mauvaise qualité assurément, mais enfin comme un conducteur. Pour rendre aussi faible que possible sa résistance, il faut rendre aussi grande qu'on le peut sa *section*, et pour cela, envelopper complètement l'une des électrodes par l'autre; telle est la raison fort simple de l'emploi des zincs ou des charbons circulaires; il faut également diminuer l'épaisseur de la tranche liquide, c'est-à-dire la *longueur* de ce conducteur, en rapprochant autant qu'on le peut les deux électrodes. Nous verrons dans le prochain chapitre pratique les observations que soulève cette dernière condition en parlant des piles à circulation ou à écoulement.

On conçoit aussi sans difficulté que plus un élément de pile sera grand, plus sa résistance intérieure sera faible, pour un même écartement des électrodes, puisque la section de la tranche liquide à traverser sera plus grande. Telle est, avec la possibilité d'une plus grande durée de fonctionnement, la supériorité des grands éléments de pile sur les petits : quant à la f. é. m., nous savons qu'elle reste toujours identique, que l'élément soit minuscule ou qu'il soit gigantesque.

RENDEMENT D'UNE SOURCE D'ÉLECTRICITÉ

Nous parlions il n'y a pas bien longtemps de puissance perdue et de puissance utile d'une pile.

Ceci nous amène à étudier son *rendement*.

Une pile possède un mauvais rendement, cela va de soi, quand la plus grande partie de la puissance qu'elle développe est perdue en chaleur dans le liquide. Elle a au contraire bon rendement si presque toute la puissance totale est dépensée dans le circuit extérieur, où elle produit un effet utile. En un mot, le rendement est le rapport de la puissance utile à la puissance totale. Il est donc toujours plus petit que l'unité, car la puissance utile ne peut jamais être supérieure, ni même égale à la puissance totale.

On exprime un rendement en centièmes et on dira par exemple qu'il est de 90 0/0 si la puissance utile est les 9 dixièmes de la puissance totale. Nous avons vu qu'en appelant E la f. é. m., e la diff. de pot. aux bornes d'une pile qui débite, et I le courant, la puissance utile est $e I$, la puissance totale $E I$. Le rendement est donc

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

Ainsi, si $E = 2\text{v}$, $e = 1\text{v},6$, on a $R = \frac{1,6}{2} = 80\ 0/0$, tandis que si e tombe à $1\text{v},2$, c'est-à-dire si on augmente le débit en diminuant la résistance extérieure, le rendement devient $\frac{1,2}{2} = 60\ 0/0$.

Donc, plus la diff. de pot. aux bornes est voisine de la f. é. m. E , c'est-à-dire moins la pile débite, plus le rendement est voisin de l'unité, meilleur il est.

On aurait donc intérêt, pour ne pas gaspiller une énergie si coûteuse, de ne faire marcher les piles qu'à faible débit. Mais alors, en revanche, I étant très petit, la pile ne développe qu'une puissance $E I$ bien plus petite que celle qu'elle pourrait développer. Elle est donc mal utilisée. D'autre part si on débite beaucoup, la puissance développée est grande, mais le rendement détestable. On est donc obligé de se tenir à cheval entre ces deux extrêmes et on fait débiter à une intensité moyenne. Cela n'empêche qu'on ne perd jamais guère moins dans les piles de 20 à 30 0/0 de la puissance totale, soit un rendement de 70 à 80 0/0.

Nous savons encore que $e = R I$ (v. page 66) et $E = (R + r) I$ (v. page 65).

Donc le rendement $\frac{e}{E}$ peut encore s'écrire :

$$\frac{R I}{(R + r) I} \text{ ou } \frac{R}{R + r}$$

et sous cette dernière forme, on voit qu'il est d'autant plus près de l'unité, d'autant meilleur, que la résistance intérieure r est plus faible.

Si elle était nulle, le rendement serait représenté par $\frac{R}{R}$ c'est-à-dire toujours égal à l'unité et serait ainsi toujours intégral ! Et en effet, la résistance intérieure étant nulle, rien ne s'y consommerait.

Malheureusement, pile sans résistance intérieure et merle blanc sont un peu de la même famille. Les meilleurs éléments de piles à deux liquides de 20 à 25 cm de hauteur ont encore une résistance de 0,1 ohm au moins, correspondant, pour un débit de 5 ampères, à une puissance perdue $r I^2 = 2,5$ watts.

Or, 2,5 watts, c'est beaucoup pour une pile !

Il y a pourtant un cas où le rendement d'une pile est intégral, c'est quand elle débite sur une résistance extérieure très grande. En effet, r est alors négligeable devant R , c'est-à-dire que le rendement $\frac{R}{R + r}$ se réduit à $\frac{R}{R}$ ou à l'unité. Mais alors, le courant est très faible, la pile ne débite presque rien.

Autrement dit, le rendement d'une pile est parfait quand cette pile ne sert à rien. Nous voilà bien avancés !

Arrêtons là ces exercices de calcul, que nous avons à dessein multipliés et que nous pourrions encore longtemps prolonger. Tout ce que nous pouvons affirmer au lecteur, quitte à nous entendre, avec une douce satisfaction, traiter de *rabâcheur* — il n'y a qu'en tapant sur les clous qu'on les enfonce — c'est qu'il ne perdra pas son temps en manipulant toutes ces formules, en se familiarisant avec elles et en tâchant de se rendre compte de ce qu'elles représentent.

Ainsi soit-il.

RÉSUMÉ

De même que la puissance d'une chute est caractérisée à la fois par sa hauteur et par son débit, la puissance électrique d'une source d'électricité est égale au produit EI de sa force élec-

tromotrice par son débit. Ce produit s'exprime en *watts*, le watt étant la puissance développée par un courant de 1 ampère circulant sous l'effet de 1 volt.

De même que l'écoulement entre deux vases communicants s'arrêterait si nous n'avions pas un système susceptible de remonter le liquide au prix d'une dépense d'énergie extérieure, de même le courant électrique traversant un conducteur reliant les deux pôles d'une pile tarirait bientôt, si l'action chimique dans cette pile n'avait pour effet d'entretenir la différence de niveau entre ces deux pôles, en remontant en quelque sorte à chaque instant vers le pôle positif, la quantité d'électricité que le conducteur déverse au pôle négatif.

Il faut donc s'imaginer un système conducteur parcouru par un courant comme un *circuit fermé*, la circulation se continuant à travers la source. Cette source oppose à la circulation pour sa part, une résistance que l'on appelle *résistance intérieure*. Par conséquent, de la puissance *totale* fournie par la pile, une certaine partie, ou puissance *perdue*, est absorbée dans la pile sous forme d'échauffement; l'autre partie apparaît dans le conducteur et est la puissance *utile*. On appelle *rendement* le rapport de la puissance utile à la puissance totale. Pour que ce rendement soit bon, il faut que la pile ait une faible résistance intérieure et ne débite pas trop.

C'est la résistance intérieure des sources électriques qui est cause que la différence de potentiel aux bornes d'une pile qui débite est toujours *plus faible* que la f. é. m., et *varie avec le débit*. Pour éviter ces variations très préjudiciables comme pour améliorer le rendement, on doit chercher à diminuer la résistance intérieure. On y arrive en prenant de grands éléments, en enveloppant complètement l'une par l'autre les deux électrodes et en les rapprochant autant que possible.

CHAPITRE SIXIÈME

LA LUTTE CONTRE LA RÉSISTANCE INTÉRIEURE

SUPPRESSION DU VASE POREUX

Nous savons maintenant que la polarisation n'est pas le seul ennemi des piles. La résistance intérieure en est un aussi grave. A vrai dire, ces deux malfaiteurs sont un peu de la même famille, car nous pouvons bien ajouter maintenant que si la gaine gazeuse qui se forme sur l'électrode positive polarisée est si nuisible, c'est surtout parce qu'elle est à peu près imperméable au courant et augmente énormément la résistance intérieure.

Nous avons cherché, dans un chapitre précédent, à réduire à l'impuissance la polarisation ; cherchons maintenant les moyens pratiques de nous débarrasser, dans la mesure du possible, de la résistance intérieure. D'abord, en agrandissant les éléments, nous gagnons quelque chose, c'est entendu. Mais on conçoit qu'on ne puisse aller bien loin dans cette voie, car des éléments gigantesques n'ont pas seulement l'avantage de leur grandeur ; ils sont encombrants, coûteux d'achat et d'entretien.

Une chose plus intéressante à considérer, c'est l'emploi du vase poreux. Le vase poreux offre au courant une résistance appréciable à surmonter et entre pour beaucoup dans la résistance intérieure d'une pile à deux liquides.

Mais nous savons que le vase poreux joue un rôle honorable dans la lutte contre la polarisation (chapitre III), et nous ne pouvons pas lui manquer d'égards au point de le supprimer ; tout au plus pouvons-nous le modifier. Au lieu de terre de pipe peu cuite, nous pouvons le constituer en baudruche ou en parchemin végétal : c'est l'idée découverte par... quelques centaines d'inventeurs. Effectivement, nous améliorons beaucoup ainsi notre vase poreux au point de vue de la résistance ; le malheur est que si notre sac de parchemin

est plus perméable au courant, il l'est bien plus aussi aux liquides, de sorte que rapidement, dépolarisant et excitateur se mêlent en une douce intimité et qu'au bout de peu de temps, on retombe sur les inconvénients des piles impolarisables à un seul liquide : De Charlybde en Scylla. Autant, alors, employer ces piles à un seul liquide, qui, elles au moins, ont la franchise de leurs opinions, et, si elles vous mangent vos zincs à circuit ouvert, ne le font pas subrepticement, sans que vous vous y attendiez. Vous aurez en même temps de cette façon, une résistance intérieure très réduite. Ainsi des éléments à treuil de Trouvé, modèle de 20 cm de hauteur, ont une résistance intérieure de 0,07 à 0,08 ohm, alors que les piles correspondantes à deux liquides, celles de Radiguet par exemple, ont de 0,15 à 0,20 ohm.

Mais somme toute, nous l'avons dit, ce parti n'est pas fameux.

Pile de Méritens. — A propos de suppression de vases poreux, cependant, un électricien bien connu, M. de Méritens, eut, voici

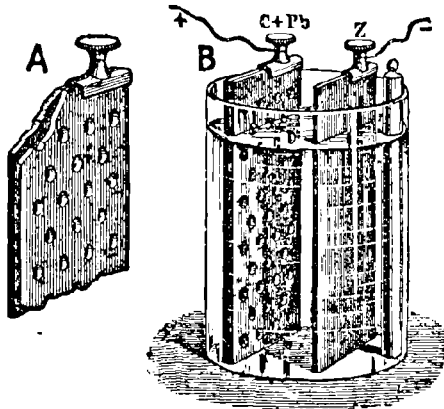


Fig. 38. — Pile de Méritens.

quelques années, une idée originale, celle d'en revenir tout simplement à la bonne vieille pile de Volta, rendue *physiquement* impolarisable. Le plus curieux, c'est qu'il y réussit, et voici comme :

En même temps que la traditionnelle lame de zinc, plongez dans l'eau acidulée sulfurique, dit M. de Méritens, une plaque *mixte* (fig. 38), constituée par deux substances conductrices différentes, charbon par exemple, et plomb le recouvrant en différents points de sa surface. Vous verrez que dans ces conditions, le circuit étant fermé, l'hydrogène ne se portera pas à la fois sur les deux substances formant l'électrode positive, sur le plomb et sur le charbon, mais seulement sur l'une d'elles : celle pour laquelle il manifeste ainsi

sa préférence, le charbon, est justement la substance la moins attaquée par le liquide, la plus *électro-positive*, et c'est logique puisque c'est pour s'y diriger qu'il a quitté déjà l'électrode négative. Donc, une partie au moins de l'électrode restera libre de tout dépôt gazeux, et de polarisation, désormais, pas plus que dans le creux de ma main ! Par conséquent, finis les vases poreux, les dépolarisants, les manipulations ennuyeuses ; plus de résistance intérieure, ou si peu que rien ; plus qu'un liquide excitateur inodore et peu coûteux.

L'éclairage électrique domestique et gratuit !

Et le fait est que la pile présentée par M. de Méritens à certaine séance de la Société des Electriciens à l'appui de ses dires parut justifier cet enthousiasme. Mise en court-circuit sur un ampèremètre, pendant la durée de la communication de son auteur, la pile débita sans une défaillance un courant de 30 ampères, que constatèrent avec stupéfaction les membres de la Société. C'était un joli résultat pour un élément dont les électrodes présentaient un décimètre carré de surface !

Comment se fait-il donc qu'il existe encore aujourd'hui autre chose que des piles Méritens après une semblable démonstration ?

M. de Méritens avait-il exagéré ses conclusions, comme d'autres expériences parurent le démontrer à M. Hospitalier ? La lame de plomb *platiné* qu'il était obligé d'employer pour éviter la formation d'une couche non conductrice de sous-oxyde de plomb (?) fit-elle reculer par son prix ? La dépolarisation était-elle réellement si prolongée ?

Puis, il faut bien le dire, si le dépolarisant a des inconvénients, il a aussi du bon, en dehors même de son rôle « antigainex » : Si le zinc trouvait tout préparé l'oxygène qui lui est nécessaire pour se dissoudre à l'état d'oxyde de zinc dans l'acide sulfurique de la pile, cette dissolution produirait une très grande énergie. Malheureusement dans la pile de Volta, le zinc ne peut trouver cet oxygène que dans l'eau : il doit le disputer à l'hydrogène, rompre la combinaison qui lie ces deux gaz ; or il faut pour cela beaucoup d'énergie, presque toute celle que développe la dissolution dans l'acide. Ce n'est donc plus que le *reste* de cette énergie qui peut apparaître sous forme électrique, et c'est peu. Aussi, dans les piles genre Volta — dans notre pile de Méritens entre autres — la f. é. m. est-elle peu élevée, soit 0,8 volt au maximum.

Quand un dépolarisant est ajouté dans la pile, les choses ne se passent plus ainsi : l'eau commence bien encore par être décomposée au prix d'un effort considérable ; seulement, l'hydrogène produit trouve sur son chemin l'oxygène presque disponible du dépolarisant,

avec lequel il se recombine, ce qui restitue presque toute l'énergie qui avait été dépensée lors de la décomposition de l'eau, énergie qui reparait sous forme électrique : Nous reprenons d'une main, grâce au dépolarisant, ce que nous perdons de l'autre. Si donc le dépolarisant, de par le vase poreux, augmente la r. intér. de la pile, par contre, il exerce une action précieuse en vertu de laquelle la f. é. m. est beaucoup augmentée. C'est grâce à cette action, en effet, que la f. é. m. de beaucoup de piles usuelles peut atteindre et dépasser 2 volts.

Mais pour en revenir à la pile de Méritens, on voit qu'en plus des inconvénients déjà signalés, elle a encore celui d'une f. é. m. très faible. Sans doute faut-il voir dans ces diverses raisons les causes de son enterrement rapide, car le fait est qu'après sa sensationnelle apparition, personne n'en entendit plus parler,

Peut-être, en la perfectionnant un peu, pourrait-on l'exhumer avec avantage.

En dehors de ce dispositif réellement très intéressant de la pile de Méritens, force nous est de reconnaître que le vase poreux n'est décidément pas dans une pile chose commode à supprimer. Nous nous y résignerons donc et nous demanderons à d'autres moyens de réduire la résistance intérieure.

PILES A ÉCOULEMENT

Rappelez-vous que la couche liquide qui sépare les deux électrodes et que le courant doit franchir est un conducteur comme un autre : on en doit diminuer la résistance en réduisant la longueur à traverser, c'est-à-dire son épaisseur.

Pourquoi, alors, s'embarrasser de la résistance intérieure, vous exclamez-vous ! Ne voilà-t-il pas un admirable moyen de la réduire autant que nous voulons ? Ne pouvons-nous pas rapprocher jusqu'à la plus extrême limite nos deux électrodes à la condition de ne les faire toucher en aucun point, c'est-à-dire de n'établir aucun court-circuit ?

Votre remarque est parfaitement juste... en théorie, comme beaucoup d'autres choses. Si vous essayez de la mettre en pratique, vous ne tardez pas à déchanter. Pourquoi ? D'abord parce que dans votre désir de... rapprochement, vous en avez oublié le vase poreux. Ensuite, parce que vous avez omis dans votre raisonnement une chose essentielle, à savoir que si les deux plaques sont extrêmement voisines, séparées par un ou deux millimètres, la circulation du

liquide est rendue très difficile. Voyez alors les conséquences : quand la mince couche interposée est épuisée, et cela demande tout juste quelques instants, plus d'action chimique : alors, bonsoir ! la f. é. m. tombe comme la flamme d'une lampe qui n'a plus d'huile, tandis que pourtant de l'autre côté des électrodes le liquide est encore presque intact. En somme, il faut vous rendre justice, vous aboutissez bien à la faible résistance intérieure que vous rêviez, mais, même polarisation à part, la f. é. m. obtenue n'est même pas capable de la franchir. Beau résultat ! Percez-vous de nombreux trous les électrodes, le résultat devient un peu meilleur, pas beaucoup.

C'est cette raison qui justifie la pratique suivie dans les piles ordinaires de laisser entre les deux électrodes un espace assez grand pour y pouvoir loger, outre le vase poreux, une suffisante réserve de liquide. Comme de plus il s'établit toujours une lente circulation par le fait de l'échauffement, des différences de densités, des dégagements gazeux, le liquide entre les électrodes se trouve renouvelé avant épuisement, surtout si ces électrodes sont percées de trous.

Pourtant, nous avons mis le doigt sur un des gros défauts de toutes les piles étudiées jusqu'ici :

Que sont ces piles, au fond ? Ce sont des appareils qui envoient au dehors quelque chose — ce quelque chose étant de l'énergie électrique — sans jamais rien recevoir depuis le moment où on les a chargées, jusqu'à celui où on les charge de nouveau.

Or, les animaux n'ont pas seuls la spécialité de refouler devant le travail lorsqu'ils n'ont plus rien ou plus grand'chose dans le ventre. Les piles sont logées à la même enseigne et à mesure que leur nourriture se consume, que les liquides s'épuisent, l'effort dont elles sont susceptibles va en s'affaiblissant : la f. é. m. diminue.

On doit en somme, suivant l'ingénieuse remarque de M. J. Bertrand, assimiler le débit des piles de cette catégorie à l'écoulement liquide d'un vase qui se vide petit à petit : un tel écoulement ne saurait être constant.

En pratique, cet inconvénient est toujours grave parce qu'on doit laisser le niveau s'abaisser beaucoup, les produits s'user notablement avant leur remplacement, sous peine de gaspiller ces produits et d'augmenter dans une trop forte mesure le prix du courant, déjà suffisamment respectable comme cela.

On conçoit donc qu'en fait, l'épithète de piles constantes appliquée aux piles précédentes n'est qu'un leurre et signifie tout au plus piles *plus constantes* que celles qui ne le sont pas du tout.

Conditions d'une bonne pile. — Que faire pour remédier à ce mal ?

C'est bien simple.

Au lieu de laisser le liquide en stagnation dans la pile, il faut le renouveler lentement, mais continuellement, de manière à remplacer à chaque instant les molécules de liquide épuisées par du liquide neuf et actif. Dans ces conditions, la pile restera toujours comparable à elle-même et pourra vous donner *indéfiniment* — sauf remplacements périodiques du zinc — une f. é. m. rigoureusement constante.

Dans la *pile à écoulement* ainsi réalisée, nous *forçons* donc le liquide à circuler entre les électrodes. Un nouvel avantage en est la conséquence immédiate : Rien de plus aisé ici que de mettre à profit votre remarque de tout-à-l'heure, en rapprochant extrêmement les électrodes.

Nous ne les rapprocherons pas assez, toutefois, pour ne pouvoir interposer entre elles un vase poreux, car nous savons que nous diminuons ainsi la dépense de matière, et que nous n'avons plus à nous préoccuper de l'attaque des zincs à circuit ouvert.

Malgré le vase poreux, d'ailleurs, le gain sur la résistance intérieure sera encore très grand.

Mais ce n'est pas seulement à ces deux points de vue si importants, constance de la f. é. m., petitesse de la r. intérieure, que les piles à écoulement sont remarquables.

Une pile ordinaire nécessite une provision de matières actives assez importante dès qu'on ne se résigne pas à des manipulations extrêmement fréquente ni à une baisse trop rapide de la f. é. m. C'est donc un instrument relativement assez volumineux, partant assez coûteux, et une batterie d'une dizaine d'éléments, outre son prix, nécessite une place que l'on n'est pas toujours à même de lui donner. Tout le monde n'a pas la Galerie des Machines à sa disposition.

Dans une batterie à écoulement, au contraire, par cela même que les électrodes sont très rapprochées, il est possible de réduire à la plus extrême limite le volume des éléments. Le liquide disponible dans chacun d'eux peut au besoin se réduire à quelques dizaines de centimètres cubes si son renouvellement est assez rapide. Aussi les dimensions de la batterie peuvent-elles devenir remarquablement exigües, tout le volume encombrant se localisant dans les récipients d'alimentation d'une part, de réception du liquide épuisé d'autre part.

Si la circulation des liquides est en outre suffisamment rapide, il s'ajoute aux importants avantages qui viennent d'être signalés une action *mécanique* du liquide en mouvement sur l'hydrogène, action qui complète celle de la dépoliarisation chimique et est une garantie supplémentaire de constance.

Voilà, n'est-il pas vrai, un ensemble de qualités qui plaide éloquemment en faveur des piles à écoulement. Aussi allons-nous dire quelques mots de leur réalisation pratique.

Remarquons, avant d'entrer en matière, que les piles à écoulement se construisent généralement par *batterie*, non par élément isolé (1). De cette manière, on peut faire passer les liquides d'un élément à l'autre, ce qui permet d'avoir une circulation relativement rapide tout en utilisant bien les produits. De là la disposition des éléments en

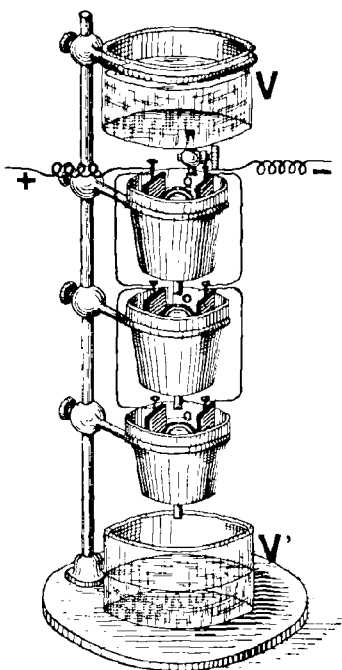


Fig. 39. — Pile Mauduit.

cascade, les uns au-dessous des autres, disposition réalisée pour la première fois dans la pile Camacho. Quand les liquides ont traversé l'élément inférieur, on peut admettre qu'ils sont assez épuisés pour être jetés.

A vrai dire, dans ces conditions, les derniers éléments ont une f. é. m. un peu plus basse que les autres, puisqu'ils sont alimentés par du liquide presque épuisé; mais cette f. é. m. elle-même n'en reste pas moins *constante*, puisque la composition du liquide se maintient

(1) Nous verrons dans le chapitre suivant à relier convenablement entre eux les divers éléments qui composent une batterie pour les faire concourir à une action donnée.

toujours identique à elle-même. Or, surtout en fait d'éclairage, f. é. m. faible mais *constante* vaut mieux que f. é. m. élevée, mais *variable*.

Pile Maudit. — Nous citerons d'abord un modèle dans lequel les principes qui précèdent ont été médiocrement appliqués, — d'abord c'est une pile à un seul liquide — mais qui présente en manière de compensation l'avantage de pouvoir être construite par le premier amateur venu.

La pile Maudit se compose de plusieurs éléments disposés les uns au-dessus des autres sur les étages successifs d'un support de chimie (fig. 39) ou d'un meuble en bois que le moins menuisier des amateurs aura la prétention de construire, en lui donnant au besoin des dimensions telles que plusieurs éléments puissent se loger sur chaque tablette.

Comme vases extérieurs, M. Maudit a jeté son dévolu — idée bizarre — sur de vulgaires *pots à fleur* en terre qu'il élève à la hau-

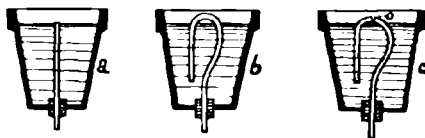


Fig. 40. — Mécanisme de l'écoulement dans la pile Maudit.

teur de leur mission en les enduisant intérieurement et à chaud d'une mixture ainsi composée :

Coaltar.....	300 grammes.
Bitume.....	100 grammes.
Suif.....	50 grammes.

Les réservoirs alimentateur et récepteur V et V', munis de robinets pour régler l'écoulement, étant placés l'un au-dessus, l'autre au-dessous, on conçoit que pour réaliser une pile à écoulement au sens strict du mot, il suffirait de faire passer par le trou dont est percé le fond de chaque vase, à l'aide d'un bouchon de caoutchouc, un simple tube droit qui arriverait presque à la partie supérieure du vase correspondant (fig. 40 a) et constituerait un trop-plein se déversant dans le vase inférieur.

Mais si l'on opérerait ainsi, ce serait le liquide de la partie supérieure de chaque vase qui serait évacué; or, le liquide, en s'épuisant, augmente de densité et gagne le fond : c'est ce liquide de la partie inférieure qu'il faut arriver à évacuer.

Nous sommes donc conduits à recourber le tube d'évacuation de

manière à amener son orifice jusqu'à cette partie inférieure (fig. 40 b), Mais ce dispositif est encore défectueux, car dès que par suite de l'écoulement du vase supérieur le niveau liquide dépassera la courbure supérieure du tube, le siphon s'amorcera et l'écoulement ne cessera que lorsque tout le liquide aura déguerpi. Moyen trop radical !

Que faire, alors ? C'est ici que M. Mauduit s'est montré tout à fait machiavélique. Son tube recourbé étant en *plomb*, il l'a percé au sommet de la courbure d'un trou minuscule O (fig. 40 c). Un point, c'est tout. Vous n'avez pas l'air de très bien saisir ? Mettons alors ledit point sur les *i*.

Dès que par suite de l'écoulement du vase supérieur le niveau du liquide dépasse le sommet de la courbure, le tube étant tout entier immergé, la longue branche se remplit d'eau, qui s'écoule dans le vase inférieur : comme le trou O est très petit, il ne peut passer par cet orifice assez de liquide pour remplacer celui qui s'écoule ; c'est donc la branche courte qui va fournir la presque totalité du débit — et ce, en liquide épuisé, puisque... puisé au fond du vase — de sorte que le tube recourbé fonctionne d'abord presque comme si l'orifice O n'existait pas. Mais le niveau baissant par suite de cet écoulement rapide, cet orifice est bientôt laissé à découvert par le liquide du vase. A ce moment, de l'air s'introduit par là dans le tube et désamorce le siphon, dont l'écoulement s'arrête jusqu'à ce que le niveau monte à nouveau et provoque un nouvel écoulement.

Ainsi, le liquide qui s'écoule est toujours le plus épuisé, et son écoulement se produit par intermittences successives.

La solution active est du bichromate acidulé et les électrodes consistent en plaques de charbon et zinc disposées de part et d'autre du tube d'écoulement

On le voit, le seul avantage de la pile Mauduit relativement aux piles à liquide stable est, en outre d'une manipulation plus simple, la constance de la f. é. m.

Pile Fiorina. — Beaucoup mieux conçue au point de vue de la résistance intérieure est la pile de l'Italien G. Fiorina. Mais elle est à un seul liquide comme le précédent. En outre, le système d'écoulement, se faisant par la partie supérieure, est moins bien compris que dans la pile Mauduit, ce qui est d'ailleurs d'assez peu d'importance, les éléments, ici, mesurant à peine quelques centimètres de haut.

La fig. 41 représente cette pile constituée par des cuvettes en porcelaine empilées les unes au dessus des autres, percées d'un trou

central pour le passage du tube de trop-plein, et de quatre autres aux angles de chaque cuvette : par ceux-ci passent des bouchons de cuivre formant vis de calage en même temps que contacts électriques entre le zinc placé au fond de chaque cuvette et le charbon reposant sur des rebords ménagés dans la cuvette inférieure (montage en *tension*, voir chapitre suivant). Le zinc et le charbon de chaque élément sont séparés par une couche assez mince de liquide.

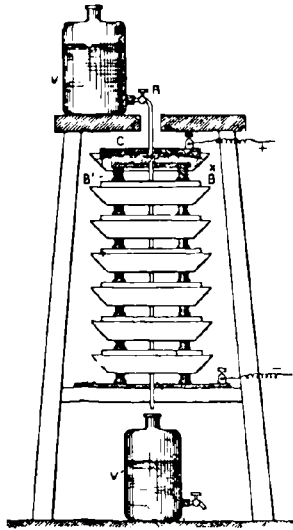


Fig. 41. — Pile Fiorina.

Cette pile est remarquable par le peu d'emplacement qu'elle nécessite, par sa faible résistance intérieure... et par la singulière prétention de son auteur qui, pour quelques bornes en moins, s'imagine avoir décroché le record de la simplicité ! Il dit, cet inventeur, avoir tenu allumées pendant 4 heures consécutives, avec 12 éléments, 4 lampes de 16 bougies demandant 2,5 ampères chacune et 20 volts : c'est donc une puissance utile totale de 200 watts.

La consommation de liquide pour cette expérience a été de 20 litres, soit 2,25 kilogr. de bichromate.

Pile Devaux. — Nous avons gardé pour la fin un modèle de pile à écoulement qui résume pratiquement de la manière la plus rationnelle tous les avantages que nous avons signalés à l'actif des piles à écoulement.

Ce modèle, des moins connus — la modestie de la violette! — est celui de M. L. Devaux, de St-Quentin. Disons qu'il n'est pas exploité industriellement et qu'il faut le construire soi-même.

D'abord, la pile Devaux est à deux liquides. Premier bon point. Les vases extérieurs et intérieurs dont elle se compose sont très aplatis, de manière à pouvoir réaliser dans le sens de la hauteur la surface voulue des électrodes tout en réduisant au minimum la contenance des vases. D'où, volume encombrant très faible, résistance *idem*. Deuxième bon point. Ces vases sont l'un en verre, l'autre en terre poreuse, munis à leur partie supérieure d'un bec pour l'écoulement des liquides.

De plus, l'auteur s'est dit que pour que les différents éléments soient dans les mêmes conditions, il faut que le liquide excitateur, attaque avec la même énergie les électrodes solubles des divers éléments. Ah! très bien. Voici une considération que nos précédents inventeurs avaient négligée. Mais ceci n'est possible que si l'on ne fait pas traverser successivement à ce liquide excitateur tous les éléments de la batterie, parce qu'il arrive alors épuisé aux derniers. Il faut donc que chaque vase intérieur, renfermant l'électrode soluble, reçoive *séparément* sa part de liquide neuf, qu'un distributeur convenable y fait arriver continuellement, tandis que le liquide épuisé est directement conduit à l'égout après avoir léché l'électrode soluble depuis la *partie inférieure*, où l'amène par un tube le distributeur, jusqu'à la partie supérieure, où il rencontre le bec de déversement du vase poreux.

Les grincheux vont objecter à cela que le liquide ainsi jeté à l'égout est très incomplètement épuisé, que c'est là du gaspillage, etc. Ecoutez ce que M. Devaux répond aux grincheux, avec la plus entière logique :

Ce n'est pas le liquide excitateur — simple solution d'acide chlorhydrique — qui coûte cher. Le produit coûteux, celui que par suite on a intérêt à épuiser jusqu'à l'extrême limite, c'est le liquide dépolarisant. Or, l'expérience prouve précisément que si l'épuisement du liquide excitateur est très préjudiciable à la constance d'une pile, on peut, au contraire, aller sans beaucoup d'inconvénient jusqu'à l'utilisation presque intégrale du dépolarisant.

D'où cette conclusion que, s'il est naturel de donner à chaque élément sa ration séparée de liquide excitateur, il est non moins naturel de faire parcourir au dépolarisant successivement tous les éléments de la batterie, qui, dès lors, doivent être disposés en cascade.

Sans doute cette double circulation complique-t-elle un peu la pile, mais, au moins, on a par compensation l'avantage d'être d'ac-

cord avec la logique : c'est assez rare pour mériter d'être pris en considération.

Le seul reproche à adresser à la pile Devaux — quoi donc est parfait en ce monde ? — c'est que l'évacuation des liquides se fait par la partie supérieure ; mais il faut ajouter qu'avec ces minuscules éléments, la circulation est assez active pour que la séparation des liquides par ordre de densités n'ait pas le temps de se faire.

Les liquides recommandés par M. Devaux pour le bon fonction-

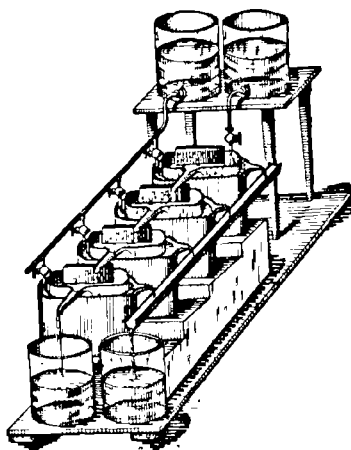


Fig. 42. — Pile Devaux. Les liquides doivent être amenés par des tubes à entonnoir au fond des vases.

nement de sa pile sont donnés par la formule suivante, quelque peu alambiquée à ce qu'il semble.

Dépolarisant	
Eau.....	100 litres
Bichromate de soude	5 kg.
Alun.....	2,5 —
Sel de cuisine.....	2,5 —
Sulfate de fer.....	2,5 —
Acide sulfurique.....	15 —
Excitateur	
Eau.....	30 litres
Acide chlorhydrique.....	1 —
Sel de cuisine.....	1 kg.

Avec une minuscule batterie de 10 éléments de 18 cm de haut et 7 cm de large, l'inventeur alimente, pendant un temps indéfini, une lampe de 20 volts et 16 bougies, ce qui suppose une puissance utile de 50 watts. En mettant un peu de mercure au fond de chaque vase poreux, on peut laisser indéfiniment la pile sous pression, à la seule condition d'arrêter l'écoulement.

CHAPITRE SEPTIÈME

COUPLAGE DES PILES ET DES RÉSISTANCES

Nous allons maintenant aborder une question qui présente en pratique une importance capitale.

Voici, côte à côte, plusieurs éléments. Nous sentons bien qu'en les réunissant, qu'en totalisant leurs efforts, nous pourrions obtenir des effets plus puissants qu'avec un seul. Il n'y a pas qu'en Belgique que l'union fait la force et ce doit être le cas ici aussi bien qu'ailleurs. Mais du diable si nous savons comment nous y prendre pour utiliser à la fois tous nos éléments!

Heureusement, vous allez voir que ce n'est pas si difficile que cela en a l'air.

Le problème à résoudre est, en somme, le suivant :

Voici une résistance, le filament d'une lampe à incandescence, pour fixer les idées; nous la relions aux deux pôles de l'un de nos éléments : rien ! Nous appelons à notre secours un deuxième élément : Comment nous y prendrons-nous pour que cet élément ajoute son effet à l'autre et porte à l'incandescence notre filament ? Comment, si ce second élément n'est pas encore suffisant, en ajouterons-nous un troisième, et ainsi de suite ?

Traduisons ceci hydrauliquement. Le conducteur à faire traverser par un courant devient ici le tuyau T (fig. 43). Les sources dont nous disposons à cet effet, ce sont les vases A, B, C... pouvant mettre en jeu des différences de niveau

individuelles assez petites, et la *résistance intérieure* de ces sources est représentée par le frottement dans les tuyaux t, t' ...

Ici, nous nous rendrons très facilement compte que nous avons deux moyens de faire concourir nos différents vases à l'effet désiré : ou bien nous pouvons les superposer (fig. 43) de manière que le liquide qui circule dans T soit soumis à une pression totale déterminée par la somme de toutes les diff. de niveau, ce qui tend à le faire circuler plus fort que si un seul vase agissait ; ou bien nous pouvons placer nos vases côte à côte (fig. 44), car alors le tube reçoit *à la fois* du liquide de chacun de nos vases, ce qui tend encore à augmenter le débit.

Dans le premier cas (fig. 43), nos vases sont dits couplés

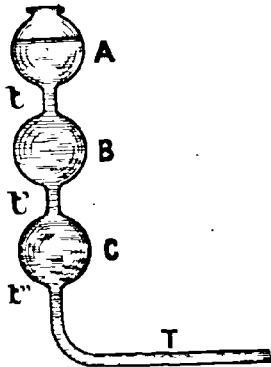


Fig. 43.

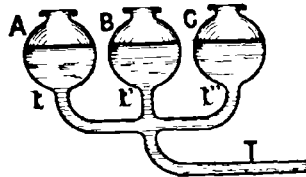


Fig. 44.

Fig. 43 et 44. — Deux manières de faire concourir les vases A, B, C à l'alimentation de T : couplage en tension, couplage en quantité.

en série ou *en tension* ; dans le second, ils sont dits couplés *en quantité* ou *en dérivation*.

Ces deux modes de couplage se retrouvent identiquement lorsqu'il s'agit de réunir des éléments de pile.

Parlons du premier mode d'abord, celui qui consistait à échafauder les uns sur les autres nos différences de niveau partielles.

Vous avez vu qu'il nous suffisait pour cela de relier le niveau supérieur de chaque système au niveau inférieur du

système suivant (fig. 43). Or, électriquement parlant, l'électrode positive est le niveau supérieur, l'électrode négative, le niveau inférieur d'une pile. Nous allons donc, comme l'indique la figure 45, relier par un conducteur le pôle + de l'élément 1 avec le pôle - de l'élément 2, puis le pôle + de celui-ci avec le pôle - de l'élément 3 et ainsi de suite. Finalement, tous nos éléments ainsi *couplés*, il existera entre les fils f et f' , entre le pôle - du premier élément et le pôle + du dernier, comme tout à l'heure entre le haut et le bas de notre échafaudage de réservoirs, une diff. de niveau électrique totale qui sera égale à la somme des f. é. m. partielles de tous nos éléments.

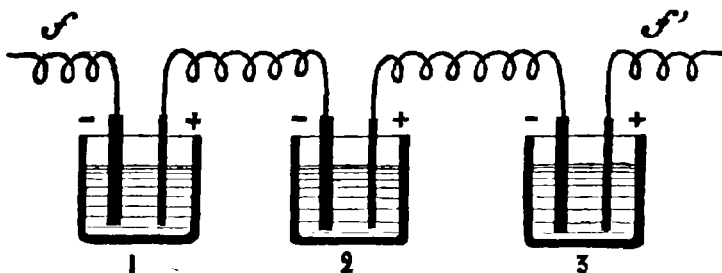


Fig. 45. — Couplage des piles en tension.

En doutez-vous ?

En ce cas, et si l'analogie hydraulique ne vous suffit pas, raisonnons un peu :

Nous avons commencé, avons-nous dit, par relier le charbon de la première pile au zinc de la seconde. Ce faisant, nous avons amené zinc et charbon au même potentiel. Vous ne saisissez pas ? S'il persistait entre eux la moindre différence de potentiel, il circulerait dans le conducteur qui les réunit un courant, et ceci n'est pas possible, puisque le circuit n'est pas fermé. Donc, le zinc de 2 se trouve porté au potentiel E par rapport au zinc de 1.

Mais l'action chimique ayant pour effet de créer entre le zinc et le charbon de 2 une nouvelle diff. de pot. E , il s'ensuit qu'entre le zinc du premier élément et le charbon du second, il existe une diff. de pot. $2E$, égale à la somme des deux f. é. m... Réunissons ce charbon de 2 au zinc de 3. Pour

la même raison, nous aurons entre les électrodes extrêmes une f. é. m. totale égale à $3 E$, et ainsi de suite.

Nous voyons donc que si nous couplons en tension un nombre quelconque d'éléments, la f. é. m. qui agira entre le zinc du premier élément et le charbon du dernier sera égale à la somme de toutes les f. é. m. partielles. Si nous réunissons ces pôles par un système conducteur, le courant qui s'établira sera dû à cette f. é. m. totale, mais nous voyons aussi qu'il aura à vaincre, en plus de la résistance du conducteur, la somme de toutes les résistances intérieures des piles, puisqu'il devra les traverser les unes après les autres.

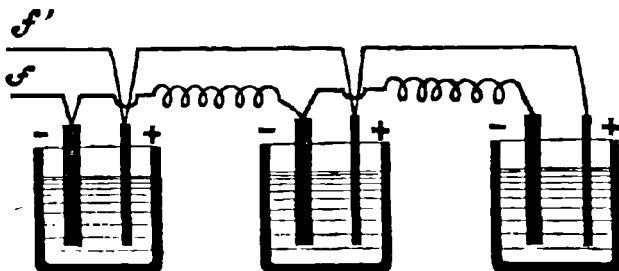


Fig. 46. — Couplage des piles en quantité.

On peut donc dire qu'en couplant plusieurs éléments en tension, la *batterie* obtenue est équivalente à une pile unique qui aurait comme f. é. m. la *somme de toutes les f. é. m. partielles* et comme résistance intérieure la *somme de toutes les résistances intérieures*.

Exemple : 10 éléments de 2 volts et 0,3 ohm couplés en tension équivalent à une pile unique qui aurait 20 volts et 3 ohms.

Et le couplage en quantité ?

D'après l'analyse hydraulique (fig. 44), il suffit de mettre les niveaux correspondants des différentes sources en relation entre eux et avec le conducteur. Cela revient (fig. 46) à relier entre eux tous les pôles + d'une part, tous les pôles - d'autre part, et à réunir par le conducteur à alimenter les deux pôles communs.

Mais quels sont les avantages de ce mode de couplage ?

Effectivement, il faut y regarder à deux fois, car ils n'apparaissent pas aussi clairement que ceux du couplage en tension : Ici, la batterie tout entière ne possède pas une f. é. m. plus élevée qu'un seul élément, puisque nous n'avons fait que relier entre eux des points respectivement au même niveau électrique.

Pourtant, nous nous rendons encore assez facilement compte que s'il s'agit de fournir un certain débit sur un circuit extérieur, chaque élément n'a à fournir séparément qu'une partie de ce débit, de même que chacun des vases de la fig. 44; en conséquence, à débit total égal, l'usure des produits dans chaque élément sera moindre et le débit total pourra être maintenu plus longtemps. Mais il ne s'agit pas d'économiser nos produits, il s'agit d'obtenir un effet plus intense! Eh bien, à cet égard aussi, le montage en quantité est justifié et voici de quelle façon :

Comme nous venons de le faire remarquer, si notre batterie doit alimenter un conducteur, chaque élément n'a à fournir qu'une partie du débit total, par exemple, le quart, s'il y a quatre éléments couplés. Dans ces conditions, la perte en frottement dans les piles est beaucoup moins grande que si une seule devait fournir le débit total; donc la diff. de pot. aux bornes est plus grande et notre conducteur est traversé par une intensité plus grande. C. Q. F. D.. suivant la locution consacrée.

Cela est facile à représenter par quelques formules.

Soit I le débit à fournir par n éléments identiques couplés en quantité.

Chacun d'eux n'a à fournir que $\frac{I}{n}$. Donc la perte de voltage dans les éléments n'est que $r \frac{I}{n}$, en appelant r la r. int., au lieu que si un élément travaillait seul pour fournir I , la perte serait $r I$. Ainsi, dans le cas de la batterie, la perte de potentiel est n fois plus petite, c'est-à-dire que cette batterie se comporte comme un élément de pile unique dont la résistance intérieure serait n fois plus petite.

Ainsi, lorsque n éléments sont couplés en quantité, la batterie obtenue est équivalente à une pile unique dont la f. é. m. serait celle d'un seul élément, mais la résistance intérieure n fois plus petite.

On peut remarquer que dans un montage en tension les volts de tous les éléments s'ajoutent, tand's que dans un montage en quantité, ce sont les ampères fournis par les différents éléments qui s'ajoutent.

CHOIX DU COUPLAGE .

Nous sommes maintenant édifiés sur les procédés à employer pour coupler plusieurs éléments et sur les conséquences de ces couplages. Voilà qui est bien.

Mais vous sentez cependant que ceci n'est pas suffisant : Lequel de ces deux modes de couplage emploierons-nous dans tel cas particulier? Voici une lampe à incandescence qu'il

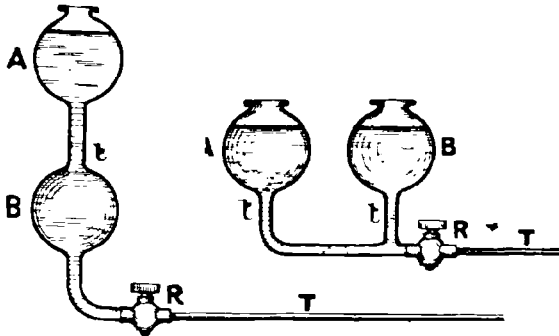


Fig. 47 et 43. — En couplant A et B en quantité, on n'augmente pas beaucoup le débit dans le tuyau étroit T, mais on l'augmente en couplant A et B en tension.

s'agit d'alimenter avec ces quelques éléments. Quelle façon de coupler va être la meilleure? Vous voilà de nouveau fort embarrassés!

Cela dépend des conditions.

Supposons d'abord que la résistance R que nous voulons alimenter soit très grande relativement à la résistance intérieure r d'un élément. Le problème est analogue à celui qui consiste à faire traverser par un débit aussi grand que possible un tuyau long et étroit T (fig. 47 et 48) en l'alimentant par des vases A et B remplis d'eau et dont la résistance inté-

rieure, faible, est représentée par celle des *gros* tuyaux t, t' .

Comment disposerons-nous ces vases ?

Remarquons ceci :

Que nous employions un seul vase pour alimenter notre tuyau, ou que nous en employions deux placés au même niveau comme l'indique la figure 48 (montage en quantité), c'est toujours la même différence de niveau qui agit ; et comme les frottements sont à peu près les mêmes dans les deux cas, puisqu'ils sont localisés en T, le débit dans celui-ci n'augmente pas sensiblement.

Donc, inutile de coupler en quantité.

Au contraire, réunissons les deux vases comme l'indique la figure 47 (couplage en tension) : les frottements restent sensiblement les mêmes que dans le cas d'un seul vase, mais la différence de niveau doublant, le débit dans T est notablement augmenté.

On peut tenir un raisonnement analogue pour l'électricité et on en conclura que s'il s'agit de faire débiter des piles sur une résistance extérieure *très grande*, nous les couplerons *en tension*, mais *pas en quantité*.

C'est le cas par exemple lorsque des piles servent à actionner une sonnerie.

Supposons maintenant, au contraire, une résistance extérieure *très faible* par rapport à la résistance intérieure de nos piles.

Hydrauliquement parlant, ceci correspond au cas d'un tuyau *très gros* T (fig. 49 et 50), que doivent alimenter des systèmes A et B à *grande* résistance intérieure t, t' . Supposons d'abord que T soit alimenté par A seulement (fig. 50), le robinet de B étant fermé. On voit que le débit dans T n'est que ce que t veut bien laisser passer, puisque presque tout le frottement y est localisé. Donc, si on ajoute B en quantité avec A, en ouvrant son robinet, ce qui s'écoulera de B se joindra sans obstacle à ce qui s'écoulera de A pour traverser T dont la section est très grande. Par ce couplage en quantité, nous augmenterons donc le débit.

Supposons au contraire qu'on réunisse les vases en tension, comme l'indique la figure 49 : on double bien la différence de niveau, mais on double aussi les frottements, puisqu'ils sont

localisés en t et t ; de sorte que le débit dans T n'augmente pas. Ainsi, au contraire de tout à l'heure, c'est perdre son temps que de coupler en tension, il faut coupler en quantité.

Appliquant ces conclusions à l'électricité, nous nous rappellerons que lorsque nous aurons à faire débiter le plus possible des piles sur un circuit très *peu résistant* par rapport à leur résistance intérieure, il faudra les coupler en *quantité* mais *pas en tension*.

Pour vérifier numériquement ces deux règles, appliquons-les à quelques exemples :

1^{er} cas. Soit à faire passer le plus grand courant possible à

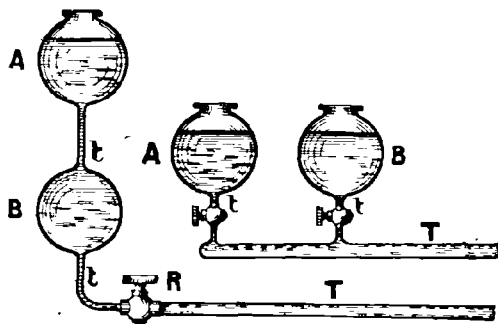


Fig 49 et 50. — En couplant A et B en tension, on n'augmente pas beaucoup le débit dans le gros tuyau T, mais on l'augmente en couplant A et B en quantité.

travers un conducteur de 12 ohms à l'aide de 5 piles pour lesquelles $E = 2$ volts, $r = 0,3$ ohm.

Montage en tension : f. é. m. de la batterie = $5 \times 2 = 10$ volts, R intérieure = $0,3 \times 5 = 1,5$ ohms ; courant produit = $\frac{10}{12 + 1,5} = 0,741$ ampère.

Montage en quantité : f. é. m. de la batterie = 2 volts, R int. = $\frac{0,3}{5} = 0,06$ ohm ; courant produit = $\frac{2}{12 + 0,06} = 0,166$ ampère seulement.

Or, avec un élément seul, on aurait un courant de

$$\frac{2}{12 + 0,3} = 0,163 \text{ ampère}$$

on voit donc combien dans ce cas il est inutile de coupler en quantité et quel intérêt il y a à coupler en tension.

2^e cas. Soit à alimenter un conducteur de 0,05 ohm à l'aide de 4 éléments pour lesquels $E = 1,5$ volt et $r = 0,4$ ohm.

Montage en quantité : f. é. m de la batterie = 1,5 volt, $R \text{ int.} = \frac{0,4}{4} = 0,1$ ohm; courant produit = $\frac{1,5}{0,1 + 0,05} = 10$ ampères.

Montage en tension : f. é. m de la batterie = $1,5 \times 4 = 6$ volts, $R \text{ int} = 0,4 \times 4 = 1,6$ ohm; courant produit

$$I = \frac{6}{1,6 + 0,05} = 3,64 \text{ ampères.}$$

Or, avec un seul élément on aurait un courant de

$$\frac{1,5}{0,4 + 0,05} = 3,33 \text{ ampères :}$$

on voit de même combien dans ce cas, il est inutile de coupler en tension et quel intérêt il y a à coupler en quantité.

Vous voilà donc tiré d'embarras !

Pas tout à fait, pourtant.

Et si ma résistance n'était ni très grande, ni très petite par rapport à la résistance intérieure de nos éléments, mais au contraire en était voisine ?

Il faut vous dire d'abord que par des considérations dans lesquelles nous n'entrerons pas ici, on démontre qu'on retire le maximum d'effet d'une pile ou d'une batterie sur un conducteur extérieur, on lui fait produire sa *puissance utile maxima* lorsque la *résistance de ce conducteur extérieur* est justement *égale à la résistance intérieure* de la pile ou de la batterie. Plus on s'écarte de cette égalité, moins la puissance absorbée dans le conducteur est grande.

Par conséquent, *si l'on veut produire le maximum d'effet* dans un conducteur donné, tel qu'une lampe, par exemple, et qu'on ne possède qu'un certain nombre d'éléments pour arriver à ce résultat, il faudra coupler les éléments de telle façon que la résistance intérieure de la batterie formée soit *aussi voisine que possible* de la résistance du conducteur extérieur.

C'est bien cela que nous faisons lorsque, ayant à débiter sur une *grande résistance*, nous couplons *en tension*, car

ajoutant toutes les résistances intérieures, nous nous rapprochons autant que possible de la résistance extérieure.

C'est encore ce que nous faisons lorsque, ayant à débiter sur une *résistance très faible*, nous couplons *en quantité*, car nous diminuons ainsi la résistance intérieure et la rapprochons par suite de celle du conducteur extérieur.

Mais j'en reviens à notre cas embarrassant de tout à l'heure et je suppose que j'aie à coupler une dizaine d'éléments, dans les conditions de maximum d'effet, sur une résistance extérieure R peu différente de la résistance interne r d'un élément.

Supposons, par exemple, R un peu plus grand que r . Pour

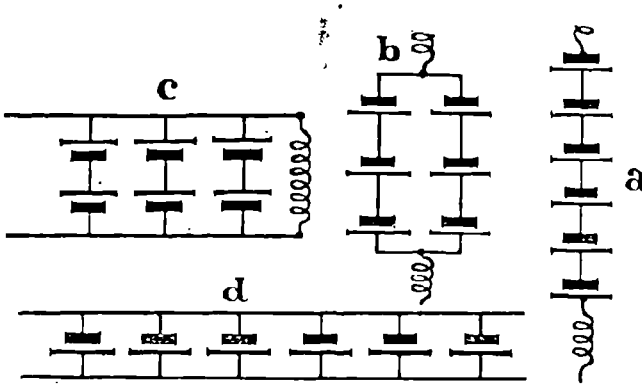


Fig. 31. — Différents couplages possibles de 6 éléments.

obéir à la règle précédente, nous couplons nos 10 éléments en tension : or, la résistance de la batterie, soit $10r$, est maintenant bien supérieure à R ; nous avons donc dépassé le but et n'obtenons pas par suite le maximum d'effet de nos 10 éléments.

Je suppose au contraire que R soit un peu plus petit que r .

Si nous couplons en quantité, nous obtenons une batterie dont la résistance intérieure, $\frac{r}{10}$ est devenue beaucoup plus petite que R . Là encore nous avons dépassé le but.

Dans un cas comme dans l'autre, pourtant, nous sentons bien qu'il doit y avoir moyen d'utiliser nos dix éléments avec plus de profit qu'un seul. Et, en effet, il suffit de recourir à un couplage *mixte* en quantité et en tension.

Voici, par exemple, 6 éléments.

Groupés en tension, ils nous fournissent une batterie (fig. 51, *a*) dont la f. é. m. est $6E$, la r int. $6r$.

Formons-en maintenant deux groupes de 3 en tension : chacun de ces groupes étant équivalent à une pile unique, mais dont les constantes sont $3E$ et $3r$, nous pouvons les réunir en quantité (fig. 51, *b*), ce qui nous donne un *couplage mixte* de 3 éléments en tension et 2 en quantité. Conformément aux principes ordinaires, la f. é. m. de cette batterie est toujours $3E$, mais la résist. intér. est $\frac{3r}{2} = 1,5r$.

De même, nous pourrions faire 3 groupes de chacun deux éléments en tension et réunir en quantité (fig. 51, *c*) : les constantes de ce montage par 2 en tension et 3 en quantité seraient $2E$ et $\frac{2r}{3}$ ou $0,67r$.

Enfin nous pouvons coupler les 6 éléments en quantité (fig. 51, *d*) ce qui nous donnera comme constantes E et $\frac{r}{6}$ ou $0,167r$.

Ces différents modes de couplages fournissent, par conséquent, différentes valeurs pour la résistance intérieure de la batterie obtenue : lorsqu'il s'agira de faire passer le plus grand courant possible dans une résistance donnée, on cherchera, dans toutes ces valeurs possibles de la résistance intérieure, la plus voisine de la résistance extérieure et on prendra le mode de couplage correspondant.

Prenons un exemple : Faisons $r = 0,2$ ohm et f. é. m. = 2 volts dans l'exemple précédent.

Ceci nous donne 4 valeurs possibles pour la r . int. de la batterie suivant le couplage : $6r = 1,2$ ohm; $1,5r = 0,3$ ohm; $0,67r = 0,134$ ohm, enfin $0,167r = 0,0334$ ohm. Supposons qu'il s'agisse d'alimenter un conducteur $R = 0,25$ ohm. Nous prendrons alors le mode de couplage fournissant $0,3$ ohm, soit 3 éléments en tension et 2 en quantité. Et, en effet, nous débiterons dans ce cas $\frac{6}{0,3 + 0,25} = 10,9$ ampères, alors que nous ne débiterions respectivement que 8,28, 10,4 ou 7,1 ampères avec les 3 autres modes de couplage.

Avant de clore ce chapitre du couplage des piles, faisons remarquer que lorsqu'une pile ou une batterie débite dans les conditions de puissance utile *maxima*, c'est-à-dire sur une

résistance extérieure égale à la sienne, la puissance perdue dans la pile est évidemment égale à la puissance utile, c'est-à-dire que le rendement est égal à $\frac{1}{2}$ ou 50 0/0. Evidemment aussi, la diff. de pot. aux bornes est alors égale à $\frac{E}{2}$.

Comme le rendement est très mauvais dans de telles conditions, il vaut bien mieux, chaque fois qu'on le peut, ne pas faire produire à la pile sa puissance maxima et se contenter d'un débit beaucoup *plus faible*.

Enfin, il suffira au lecteur de se reporter aux analogies hydrauliques figures 43 et 44 pour se rendre compte que s'il n'y a pas grand inconvénient à coupler en tension des piles de f. é. m. différentes, on ne peut au contraire les coupler en quantité parce que, loin de débiter dans le circuit extérieur, les piles à niveau électrique inférieur pourraient recevoir une partie du courant fourni par celles à f. é. m. supérieure.

D'ailleurs, règle générale, il est toujours préférable de ne coupler ensemble que des éléments identiques.

INFLUENCE DE LA TENSION SUR LES PROPRIÉTÉS DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

En mettant à profit les principes précédents, l'inventeur des accumulateurs, Gaston Planté, a pu prouver que le fossé qu'on supposait séparer l'électricité fournie par les piles, ou électricité *dynamique*, de celle fournie par les machines à frottement, ou électricité *statique*, n'existe pas en réalité : c'est seulement la différence des tensions qui produit la différence des effets, et, à l'aide de couplages convenables, on peut passer aisément de l'une à l'autre « sorte » d'électricité.

Planté a imaginé à cet effet un appareil fort ingénieux, le *coupleur rhéostatique*, qui permet de coupler d'un seul coup en tension tous les éléments d'une batterie comportant plusieurs milliers de petits accumulateurs qui, groupés en quantité, peuvent être chargés par une source de faible tension mais de grand débit (fig. 52).

La différence de potentiel aux bornes atteignant plusieurs milliers de volts lors du couplage en tension, la batterie devient capable de produire tous les effets attribués autrefois

aux seules machines statiques : étincelles violentes rappelant les éclairs, aigrettes, production de boules de feu analogues aux éclairs en boules, etc. Gaston Planté a trouvé là l'occasion d'une des plus belles études dont l'électricité ait été l'objet.

A propos de cette faculté de faire varier les effets de l'électricité par des couplages appropriés, disons encore en passant que, pour que les courants électriques soient dangereux pour la vie humaine, il faut généralement qu'ils soient *intenses* — c'est-à-dire produits par une source de *haute tension*, car c'est à cette seule condition que des courants quelque peu intenses peuvent circuler à travers le corps, dont la résistance est élevée.

Mais il ne suffit pas que le potentiel soit élevé, il faut encore que la source puisse maintenir le courant intense qui doit en résulter. C'est pour cela que les différences de potentiel

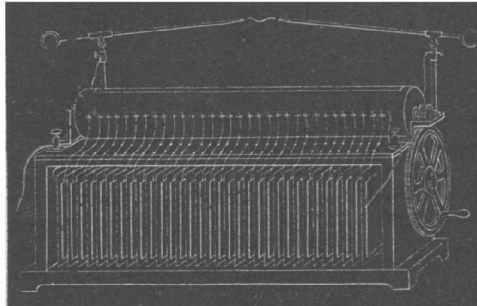


Fig. 52. — Coupleur rhéostatique de Planté.

de quelques milliers de volts des installations dites à *haute tension* sont *mortelles* en cas de contact prolongé, parce que de ce contact résulte le passage à travers le corps de courants pouvant atteindre plusieurs ampères.

C'est pour cela aussi que les courants produits par les petites machines statiques, quoique mettant en jeu des tensions de plusieurs centaines de mille volts, sont peu dangereux, parce que la résistance de ces machines étant énorme, il n'en peut résulter que des courants absolument infimes.

Pourtant, certains courants, dits à *haute fréquence*, pré-

sentent pour le corps humain une innocuité déconcertante, sur laquelle nous aurons à revenir.

Sauf cette exception — placée là juste à point pour confirmer la règle — les courants électriques à haute dose sont plutôt désagréables à l'organisme humain : c'est là un fait dont les assassins américains pourraient témoigner en toute compétence, — si l'électrocution leur laissait des loisirs. Mais que dire de la sensibilité du cheval, une des robustes bêtes de la création pourtant, que 10 malheureux volts suffisent pour mettre à terre !

Or, c'est bien plus de 10 volts que le cheval parisien rencontre parfois sous son sabot, depuis que d'entreprenantes Compagnies de traction ont parsemé le sol de la capitale de certains blocs métalliques dont la réputation n'est plus à faire. Et c'est souvent son tour, hélas ! de payer les *plots* cassés !

Certes, il serait difficile aux dites Compagnies d'imaginer façon plus élégante de *supprimer* la concurrence...

COUPLAGE DES RÉSISTANCES

Laissons là ces regrettables fantaisies et arrivons à une question qui revient à peu près aussi souvent que celle du couplage des piles, celle du couplage des résistances. Quelle est la résistance de l'ensemble d'un circuit constitué par plusieurs conducteurs différents ?

Supposez d'abord ces conducteurs branchés *en série*, à la suite les uns des autres. Dans ce cas, pas de doute. Le courant, ayant à traverser successivement ces différents conducteurs, éprouve une résistance *totale* R qui est égale à la *somme* de toutes les résistances partielles.

$$R = r_1 + r_2 + r_3 \dots$$

Le courant qui parcourt ce circuit sous une diff. de pot. e est donc

$$I = \frac{e}{R} = \frac{e}{r_1 + r_2 + r_3 \dots}$$

Par exemple, si $e = 10$ volts et $r_1 = 2$ ohms, $r_2 = 4$, $r_3 = 8$, $r_4 = 6$, on aura $I = \frac{10}{20} = 0,5$ ampère ; on voit qu'on perdra

dans la première une partie $2 \times 0,5 = 1$ volt de la diff. de pot. employée, dans la seconde $4 \times 0,5 = 2$ volts, etc.

Supposons maintenant que deux conducteurs différents r_1 et r_2 sont placés *en quantité*, en *dérivation* l'un par rapport à l'autre (fig. 53); la chose devient plus délicate.

Pourtant, vous vous rendez bien compte que le courant ayant entre les deux points de jonction deux chemins à la fois pour passer, r_1 et r_2 , passera *plus aisément* que s'il n'y en avait qu'un. Son intensité s'en trouvera donc augmentée.

Ainsi, l'ensemble des deux conducteurs r_1 et r_2 est équivalent à un conducteur *unique* dont la résistance serait moindre que r_1 ou que r_2 et s'appelle pour cette raison *résistance ré-*

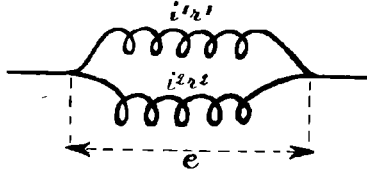


Fig. 53. — Circuit formé par deux résistances en dérivation.

duite. Mais on ne se paie pas de mots en électricité : dire que cette résistance est plus petite est passablement vague ; il est utile de voir exactement quelle en est la valeur.

Voyons :

Supposez que le système $r_1 r_2$ soit soumis à une certaine diff. de pot. e . Sous cette influence, il passe dans r_1 un courant $i_1 = \frac{e}{r_1}$ et dans r_2 un autre courant $i_2 = \frac{e}{r_2}$. Notre conducteur idéal unique, pour être équivalent à notre système, devrait donc être parcouru par un courant.

$$I = i_1 + i_2 = \frac{e}{r_1} + \frac{e}{r_2} = e \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

c'est-à-dire, en appliquant les principes arithmétiques connus de l'addition des fractions.

$$I = \left(\frac{r_1 + r_2}{r_1 \times r_2} \right) e$$

Que signifie ceci ? En l'écrivant sous la forme ordinaire de la loi de Ohm,

$$I = \frac{e}{\frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}}$$

on voit que cela signifie tout simplement que le conducteur

idéal équivalent à notre système de deux conducteurs, a comme résistance $\frac{r_1 \times r_2}{r_1 + r_2}$. C'est la résistance réduite cherchée, qui est par conséquent égale au produit des deux résistances divisé par leur somme.

Exemple : Si $r_1 = 4$ ohms, $r_2 = 2$ ohms, on aura R réduite $= \frac{4 \times 2}{4 + 2} = 1,33$ ohm, valeur *moindre* que 4 ohms ou que 2 ohms.

Supposons maintenant qu'en dérivation sur r_1 et r_2 nous placions une 3^e résistance r_3 (fig. 54). Nous diminuons encore la résistance entre les deux points de jonction, puisque nous ouvrons au courant un 3^e chemin. Pour calculer la nouvelle résistance réduite, vous supposerez que les deux premières r_1 et r_2 n'en fassent qu'une, dont vous calculerez la rés. réduite

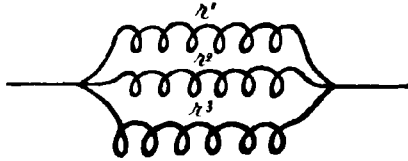


Fig. 54. — Circuit formé par 3 résistances en dérivation.

comme il a été dit. Soit R cette résistance réduite : vous agirez de la même façon sur R et r_3 .

En appliquant ce mode de calcul, on voit entre autres choses intéressantes que si on branche en dérivation entre les deux mêmes points n conducteurs identiques, la résistance réduite entre ces deux points est $\frac{r}{n}$. Vous vous rappelez (voir page 88) que c'est la formule que nous avons trouvée tout à l'heure pour la résistance réduite de piles couplées en quantité, qui ne sont en effet, au point de vue de la résistance, que des résistances égales montées en dérivation entre les deux pôles communs.

RÉSUMÉ

On couple en tension ou en série plusieurs éléments en reliant le pôle $-$ de chacun au pôle $+$ du suivant. La f. é. m. de la batterie obtenue est égale à la somme des f. é. m. de tous les éléments et sa résistance intérieure à la somme

des résistances intérieures. On couple ces éléments *en quantité* ou *en dérivation* ou *en parallèle* en reliant entre eux les pôles de mêmes noms. La f. é. m. de la batterie n'est égale dans ce cas qu'à celle d'un seul élément, mais sa résistance intérieure est n fois plus petite s'il y a n éléments. On peut aussi réaliser des couplages *mixtes* en formant des groupes égaux de plusieurs éléments en tension et réunissant ces groupes en quantité.

Pour retirer d'un certain nombre d'éléments de pile une puissance aussi grande que possible :

1° Si on doit faire débiter sur une très grande résistance, on les couplera en tension.

2° Si au contraire la résistance à alimenter est très petite, on couplera en quantité.

3° Si enfin la résistance à alimenter est voisine de la résistance intérieure de chaque élément, on choisira le couplage mixte dont la résistance intérieure sera *la plus voisine* de la résistance extérieure.

Si on veut faire travailler des éléments de pile dans de bonnes conditions de *rendement*, on aura, au contraire, intérêt à s'écarter des conditions précédentes et à ne demander à la batterie qu'un débit plus faible.

Lorsque plusieurs conducteurs sont montés en série, la résistance de l'ensemble du circuit est égale à la somme de toutes les résistances partielles. Si deux résistances sont montées en dérivation entre deux points, la *résistance réduite* qui est équivalente à leur ensemble est égale au quotient de leur produit par leur somme.

CHAPITRE HUITIÈME

PRINCIPE DES INSTRUMENTS DE MESURE

AMPÈREMÈTRES ET VOLTMÈTRES

Une étude urgente nous réclame maintenant.

Nos lecteurs n'ont eu jusqu'à présent à leur disposition pour contrôler nos assertions que... les yeux de la foi.

C'est plutôt maigre. Ces instruments de mesure très commodes mais par trop élastiques, dont force leur a été de se contenter jusqu'à présent, il est temps que nous voyions à les remplacer par d'autres moins extra-scientifiques et susceptibles de nous fournir des renseignements moins... gratuits.

Aussi bien, le niveau de nos connaissances nous permet-il maintenant d'aborder cette étude, ou tout au moins de concevoir la possibilité d'appareils de ce genre.

La base sur laquelle repose le principe de nos futurs auxiliaires est l'action déjà signalée que le courant exerce sur l'aiguille aimantée.

On ne manque jamais, dans les cours, de parler, au sujet de cette action, de certain petit bonhomme imaginaire dont Ampère recommandait l'emploi pour prévoir dans tous les cas (fig. 55) le sens de la déviation : Supposez ledit petit observateur couché tout de son long suivant le fil conducteur, de telle sorte que le courant lui entre par les pieds et lui sorte par la tête — pauvre bonhomme ! *Toujours*, si de son intéressante position il contemple l'aiguille, il verra le pôle nord de cette aiguille — celui qui regarde le Pôle Nord de la Terre — dévié *vers sa gauche*.

Or, c'est à ce petit bonhomme d'Ampère que nous allons

faire supporter tout le poids de la théorie des instruments de mesure.

Imaginons que le fil perturbateur, au lieu de passer purement et simplement, dans la direction nord-sud, au-dessous de l'aiguille aimantée, se replie de manière à l'entourer (fig. 54).

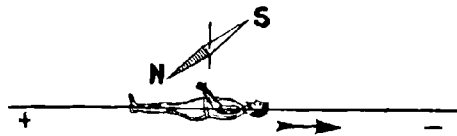


Fig. 55. — Bonhomme d'Ampère

Soit que vous imaginiez le bonhomme d'Ampère couché dans la première partie du fil, sous l'aiguille, soit que vous le supposiez couché au-dessus de l'aiguille, toujours la regardant et le courant lui entrant par les talons, vous vous rendez compte, en appliquant la règle précédente, que *toujours* il verra l'aiguille déviée du même côté. Autrement dit, le courant qui circule dans le fil au-dessus de l'aiguille agit dans le même sens que celui qui circule au-dessous. Ces deux effets s'ajoutent donc et la déviation de l'aiguille doit être plus grande que lorsque le fil ne la contournait pas.

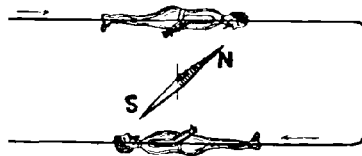


Fig. 56. — Amplification de l'action du courant sur l'aiguille aimantée.

C'est ce qu'on observe en effet.

Le résultat est trop encourageant pour que nous nous arrêtions en si beau chemin.

Continuons donc à entourer notre aiguille et faisons faire au fil un second tour : Plaçons par la pensée notre sympa-

tique bonhomme en une position quelconque du circuit : il nous indique toujours une action de même sens. Les actions partielles de toutes les portions du fil sont donc concourantes et produisent une déviation de plus en plus accentuée. Et plus nous augmenterons le nombre des tours, plus l'action du circuit sur l'aiguille aimantée deviendra énergique, de sorte qu'alors un courant extrêmement peu intense pourra être décelé, provoquer même une déviation très forte si le nombre des tours est très grand.

Pour vous donner une idée du parti qu'on a su tirer de ce fait, disons qu'on a parfois embobiné sur des appareils semblables jusqu'à 50.000 tours de fil !

Tel est le secret du rôle capital des bobines de fil en électricité.

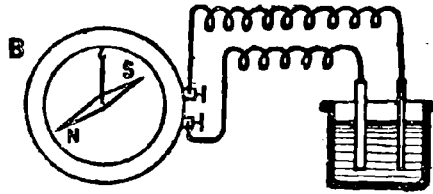


Fig. 57. — Galvanomètre simple.

Ici, la vérification de nos affirmations est aisée.

Vous n'avez qu'à enrouler de 20 ou 30 tours (fig. 57), en une bobine B de 5 à 6 centimètres de diamètre intérieur, un fil de cuivre recouvert de coton, *isolé*, pour éviter les court-circuits et forcer le courant à circuler dans toute la longueur du fil. A l'aide d'un fil de soie, vous suspendez horizontalement à l'intérieur de cet anneau, orienté du nord au sud et placé verticalement, une aiguille aimantée ; puis vous faites passer le courant d'une pile : pftt ! l'aiguille est énergiquement déviée, beaucoup plus que si votre fil, parcouru par le même courant, mais *déroulé*, était approché même très près de l'aiguille.

Vous comprenez donc pourquoi on a donné à ces appareils à bobines et à aiguille aimantée le nom de *multiplicateurs* : Ils multiplient l'action du courant.

On les appelle aujourd'hui des *galvanomètres* parce qu'ils

servent à *mesurer* l'intensité des courants *galvaniques* — de Galvani, contradicteur de Volta dans une dispute célèbre à propos de... grenouilles, et cause involontaire de la découverte de la pile.

Et vous allez voir que rien n'est plus simple que cette mesure.

Ampèremètres. — Un courant déterminé traversant la bobine d'un galvanomètre donne provoquer une déviation de l'aiguille bien déterminée, fixe et constante si le courant reste lui-même invariable. Si au contraire cette intensité augmente, la déviation augmente aussi et inversement. Ainsi, dans un galvanomètre donné, à chaque valeur de la déviation de l'aiguille correspond une valeur bien déterminée de l'intensité du courant. Par exemple, un courant de 1 ampère fera dévier

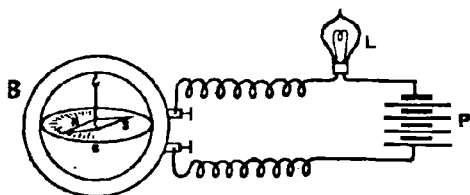


Fig. 58. — Principe de l'ampèremètre.

l'aiguille de 10° , un courant de 2 ampères la fera dévier de 19° , etc.

Rien ne nous empêche dès lors de mettre au-dessous de l'aiguille (fig. 58) un cadran C avec des points de repère pour indiquer la déviation qui correspond à 1 ampère, 2 ampères, etc., en procédant par comparaison avec un appareil type, un *étalon* soumis au même courant. Si maintenant nous faisons traverser à notre appareil un courant inconnu, son intensité sera précisément mesurée par la déviation de l'aiguille. Si cette aiguille s'arrête par exemple à mi-distance entre le trait marqué 5 ampères et celui marqué 6, nous en concluons que l'intensité cherchée est de 5 ampères et demi.

Notre galvanomètre, dans ce cas, s'appelle un *ampèremètre*.

Vous voyez donc comment nous ferons désormais pour mesurer le courant traversant un circuit : nous forcerons ce courant à traverser également notre galvanomètre en *intercalant* ce galvanomètre dans le circuit, et nous lirons sur le cadran l'intensité, comme on lit la pression sur le cadran d'un manomètre. Seulement, pour ne pas troubler le régime du circuit par l'intrus que nous y introduisons, nous aurons eu soin de faire *très faible* sa résistance, en le constituant par quelques tours de gros fil.

Voltmètres — Changeons maintenant notre fusil d'épaule et avec notre galvanomètre, essayons de mesurer des volts.

Commençons, pour cela, par enlever le *cadre* de gros fil que nous y avons placé pour la mesure des intensités, et substituons-y un autre cadre comprenant un grand nombre de tours de fil très fin, présentant une grande résistance.

Nous ne pourrons naturellement plus faire passer dans ce fil qu'un courant très faible, mais comme ce courant circulera beaucoup de fois autour de l'aiguille, il produira en définitive tout autant d'action que le courant intense de tout à l'heure : Ce qui agit sur l'aiguille, vous le concevez, c'est le nombre d'*ampères-tours* de la bobine; que ce nombre d'ampères tours soit obtenu par un grand nombre d'ampères agissant un petit nombre de fois, ou qu'il résulte d'une petite fraction d'ampère multipliée par un très grand nombre de tours, peu importe, le résultat est le même.

Cela dit, faisons agir aux bornes de notre galvanomètre à fil fin une certaine diff. de pot. Un courant prend naissance dans le fil, qui fait dévier l'aiguille suivant son intensité.

Mais la valeur de ce courant dépend de celle de la diff. de pot. et ne dépend même que de cela, puisque la résistance du fil du galvanomètre est toujours la même.

Donc, en définitive, la déviation dépendra de la diff. de pot., de sorte qu'à chaque diff. de pot. agissante correspondra une déviation déterminée.

Ainsi, une diff. de pot. de 1 volt produira une déviation de 5° tandis que 2 volts provoqueront une déviation de 9°, 3 volts 12°, etc.

Par conséquent, nous pourrions fixer sous notre aiguille un cadran sur lequel nous marquerons des points de repère pour indiquer la déviation correspondant à 1 volt, celle correspondant à 2 volts, etc. Ceci fait, si nous plaçons notre appareil aux bornes d'une source de f. é. m. ou d'une diff. de pot. inconnue et que notre aiguille s'arrête sur le trait correspondant à 6 volts, nous en concluons que la diff. de pot. mesurée est de 6 volts.

On saisit la différence entre les deux sortes d'appareils dont nous venons de parler :

Dans l'ampèremètre, c'était le courant à mesurer lui-même qui agissait directement sur l'aiguille pour la faire dévier.

Dans le voltmètre au contraire, on mesure *indirectement* une diff. de pot. par l'intensité qu'elle produit dans un circuit toujours le même.

Mais dans l'un et l'autre cas, en réalité, c'est toujours une intensité que l'on mesure, de sorte que voltmètre et ampèremètre doivent présenter un air de famille très accentué.

Au point de vue extérieur en effet, la seule différence consiste en ce qu'on voit écrit sur le cadran de l'un, *volts*, sur celui de l'autre, *ampères*. Si vous êtes plus curieux et si vous voulez voir « ce qu'il y a dedans », vous y voyez tout simplement comme différence, dans le cas de l'ampèremètre un fil gros et court — dont nous avons expliqué la nécessité — et dans celui du voltmètre un fil long et fin. Pourquoi si fin et si long ce dernier ? Rien de plus simple à comprendre.

Si la résistance intérieure d'un voltmètre n'était pas très grande, chaque fois qu'on relierait ses deux bornes aux deux points entre lesquels il s'agit de mesurer une diff. de pot., le voltmètre serait parcouru par une intensité assez grande fournie supplémentaires par la source, d'où : 1° perte d'énergie inutile et même nuisible car l'appareil chaufferait et pourrait *brûler*; 2° diminution de la diff. de pot. entre les deux points par suite de l'augmentation de débit réclamée à la source. L'appareil, en outre d'une dépense de courant inutile, changerait donc le régime de la pile ou du circuit et ne mesurerait pas ce qu'il doit mesurer.

L'emploi du fil fin et long évite naturellement tous ces

inconvenients, car la minuscule intensité supplémentaire demandée à la source n'en peut changer le régime, à moins que la complexion de celle-ci soit bien délicate, que sa résistance intérieure soit bien grande.

Il faut vous rappeler en tout cas :

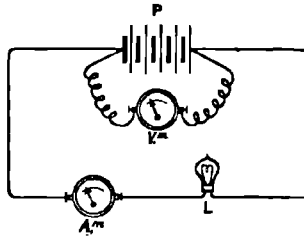


Fig. 59. — Différence entre les modes d'emploi du voltmètre et de l'ampèremètre.

1° Que l'ampèremètre s'intercale *en série* dans le circuit dans lequel il s'agit de mesurer l'intensité (fig. 59).

2° Que le voltmètre, ou bien est relié directement aux deux bornes de la source (fig. 59) et mesure, suivant qu'elle débite ou non, la diff. de pot. aux bornes de cette source ou sa f. é. m.; ou bien se place *en dérivation* entre deux points d'un circuit dont on veut connaître la diff. de pot. (fig. 60).

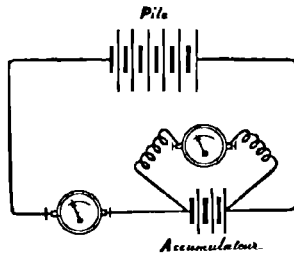


Fig. 60. — Emploi du voltmètre pour mesurer la diff. de pot. entre deux points quelconques d'un circuit.

Et remarquez en outre qu'avec ces deux instruments, vous pouvez mesurer toutes sortes de grandeurs électriques : par exemple, vous aurez la résistance d'un conducteur en mesurant la diff. de pot. à ses bornes et l'intensité du courant qui y circule et en faisant le quotient des volts par les ampères; ou bien la puissance absorbée dans ce même conducteur en faisant le produit des volts par les ampères, etc. Si les labora-

toires ont à leur disposition des appareils de mesure nombreux et compliqués, le voltmètre et l'ampèremètre sont au contraire à peu près les seuls que l'électricien praticien a l'occasion de manipuler.

RÉSUMÉ

L'action d'un courant sur l'aiguille aimantée augmente avec son intensité et avec le nombre de fois que ce courant circule autour de l'aiguille. Elle dépend du nombre des *ampères-tours* de la bobine. Tel est le principe des galvanomètres. Dans un galvanomètre donné, un courant produit une déviation d'autant plus grande qu'il est plus intense. Le galvanomètre étant préalablement *étalonné* par comparaison avec un appareil type, on peut donc mesurer l'intensité d'un courant par la grandeur de la déviation qu'il détermine, lue sur le cadran de l'instrument. Si le courant qui circule dans l'appareil est justement celui du circuit qu'on veut mesurer, l'appareil sert d'*ampèremètre*. Il doit avoir alors une faible résistance. Si, au contraire, l'intensité est provoquée par une diff. de pot. aux bornes de laquelle on a directement relié le galvanomètre, la déviation, si la graduation est faite en conséquence, donne indirectement la valeur en volts de cette diff. de pot.. L'appareil sert alors de *voltmètre* et doit posséder une grande résistance.

CHAPITRE NEUVIÈME

CALCUL D'UNE INSTALLATION D'ÉCLAIRAGE PAR PILES

Nous avons franchi sans encombre les parties les plus délicates de notre étude, et vous pouvez à bon droit vous demander quand nous verrons à tirer parti, au point de vue pratique, des connaissances que nous avons petit à petit acquises.

A cet égard, le champ est encore bien limité.

Nous ne connaissons guère, en fait de phénomènes électriques susceptibles d'applications pratiques que l'échauffement d'un conducteur, qui devient l'*incandescence* si le conducteur est infusible : tel le filament de charbon *f* de la lampe à incandescence (fig. 61), enfermé dans une ampoule de verre vide d'air qui le préserve de la combustion, et que deux fils de platine, traversant le *culot*, servent à relier avec la source d'énergie qui l'alimentera par l'intermédiaire d'une *douille* à baïonnette ou à vis.

Tel encore le filament en *magnésie* de la lampe *Nernst*, qui, rendu conducteur par un échauffement préalable, qu'une allumette permet de réaliser — curieux retour des choses d'ici-bas — émet une lumière éblouissante, bien plus belle que celle des lampes ordinaires, bien plus économique aussi puisque la bougie, au lieu de coûter 3 à 4 watts, n'en demande plus que 1,5.

Nous allons donc nous contenter pour le moment d'appliquer lesdites connaissances à l'élaboration, à l'aide de quelques éléments de piles, d'une petite installation d'éclairage électrique domestique. Non que l'éclairage par la pile soit une chose bien recommandable : nous avons fait plus d'une fois pressentir le contraire ; mais outre que ce sera un excellent moyen de mettre en œuvre les formules établies précédemment, c'est le seul but, répétons-le, que nous puissions nous donner actuellement pour nous initier à la manipulation pratique du matériel de l'électricien et nous rendre compte de certaines des ressources qu'on peut demander à l'électricité.

Choix et calcul de la batterie. — Puisqu'il s'agit d'éclairage, nous choisirons des piles aussi constantes et à aussi faible r . intérieure que possible, de manière à atténuer les variations de diff. de pot. que provoquent les variations du nombre des lampes en service (1).

Il faudra, en outre, que notre pile soit toujours prête à fournir la lumière par le simple jeu d'un interrupteur ou commutateur.

Nous choisirons donc une pile à écoulement à deux liquides (2).

Quelle devra être la puissance de notre batterie? Cela dépendra naturellement de l'importance de l'éclairage à réaliser. Mettons que nous ne ferons jamais brûler ensemble plus de 3 lampes de 5 bougies.

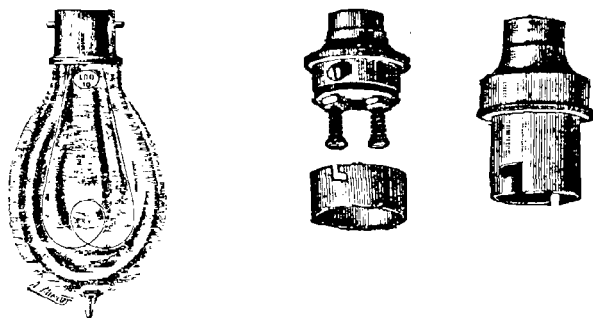


Fig. 61. — Lampe à incandescence et sa douille.

Chacune de ces bougies, si la lampe marche dans de bonnes conditions, nécessite la dépense dans le filament d'une puissance de 3 watts. C'est donc une puissance *utile* totale de $3 \times 5 \times 3 = 45$ watts qui nous est nécessaire.

Mettons 50 watts pour tenir compte des pertes inévitables dans la canalisation.

Si nous prenons, par exemple, des piles au bichromate ($E = 2$ volts), de résistance intérieure égale à 0,06 ohm, elles pourront débiter 5 ampères sous une diff. de pot. aux bornes de 1,7 volt, soit 8,5 watts utiles chacune; il nous faudra donc $\frac{50}{8,5} = 5,9$ éléments;

(1) Remarquons que si l'installation ne comporte jamais plus d'une lampe marchant à la fois, ces variations de débit n'existent pas, ce qui facilite le problème. La pile peut alors avoir une résistance interne plus grande.

(2) Si nous avons parlé des accumulateurs, nous dirions : ou de préférence une batterie d'accumulateurs alimentée par une pile à écoulement.

5,9 éléments... résultat bizarre! Mais comme vous n'êtes pas de ces gens — des savants quelquefois — qui, pour faire illusion aux autres et à eux-mêmes, poussent jusqu'à la cinquième décimale des calculs incertains depuis la première, vous ne vous amusez pas à couper un élément en deux et vous en prenez 6, tout simplement.

Mode de couplage. — Comment devons-nous coupler nos 6 éléments? Cela dépend du *voltage* des lampes à alimenter.

Nous savons qu'à raison de 3 a. par bougie chaque lampe doit absorber $5 \times 3 = 15$ watts, mais nous savons aussi que ces 15 watts peuvent être fournis sous une infinité de formes, soit par une petite intensité agissant sous une grande diff. de pot., soit par une grande intensité et une faible diff. de pot. Or, on fabrique indifféremment des lampes de voltages quelconques, en donnant à la résistance du filament des valeurs appropriées. Nous pouvons, donc pour nos lampes de 5 bougies, choisir le voltage qui nous convient le mieux, pourvu que nous puissions l'obtenir à l'aide d'un couplage approprié de nos 6 éléments.

Disons cependant que plus le voltage de ces petites lampes est élevé, meilleures elles sont; en outre, en augmentant la diff. de pot. sous laquelle la puissance est fournie, on diminue le courant et on perd moins en frottement dans la canalisation. On a donc intérêt à choisir la diff. de pot. la plus élevée possible et à coupler les 6 éléments en tension, soit $E = 12$ volts. On prendra des lampes de 10 volts pour tenir compte de la perte dans la pile et de celle dans la canalisation, ou *perte en ligne*, de sorte que les 15 watts qui se dépenseront dans chaque lampe seront fournis sous la forme $e = 10$ volts, $I = 1,5$ ampère, soit, pour les 3 lampes, 4,5 ampères que la batterie peut aisément fournir, puisque les éléments peuvent débiter 5 ampères.

Remarquons maintenant que la perte de potentiel rI dans la batterie est de 0,5 volt environ pour chaque lampe en service, puisque la résistance intérieure de cette batterie est $6 \times 0,06 = 0,36$ ohm et que la lampe consomme 1,5 ampère. Donc, la variation de potentiel qui accompagnera chaque mise en service ou extinction d'une lampe sera de 0,5 volt. Or, 0,5 volt sur 10, c'est déjà beaucoup.

En outre, quand 1 lampe seulement sera en service, elle aura à ses bornes 11,5 volts; quand il y en aura 2, il n'y aura plus que 11 volts, et plus que 10,5 volts enfin, quand les 3 seront en service.

Cette différence de 1 volt sur 12 entre les diff. de pot. extrêmes est bien grande et nous n'aurons pas beaucoup à nous louer de la fixité de la lumière. Il serait infiniment préférable, si, on le pouvait, de faire toujours marcher les 3 lampes *ensemble*.

Établissement de la batterie. — Nous supposerons, maintenant,

que nous avons consacré beaucoup de soin à l'établissement des éléments, à la mise en place de la batterie et au couplage. Les connexions entre les éléments ont été soigneusement exécutées en fixant solidement les fils dans les bornes destinées à les recevoir, et la régularité du montage, l'absence de court-circuits dans les éléments a été confirmée par un examen judicieux à l'aide du voltmètre. Il ne nous reste plus qu'à relier les deux pôles de la batterie à la *canalisation* que nous avons établie.

Canalisation. — Qu'est-ce que cette canalisation ? C'est le réseau de fils conducteurs destinés à transporter de la pile vers toutes les parties de la maison où nous en aurons besoin la différence de potentiel créée par la batterie.

Pour l'établir, nous utiliserons du fil de cuivre isolé à la gutta-percha ou simplement recouvert d'une ou deux couches de coton et de section suffisante pour ne pas absorber trop d'énergie. Il est facile

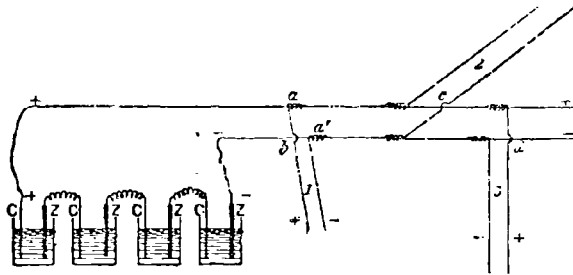


Fig. 62. — Schéma d'une canalisation électrique.

de se rendre compte de l'ordre de grandeur de cette section, qui de vra être naturellement d'autant plus grosse que le courant sera plus intense et la longueur de la canalisation plus grande. Par exemple, si notre canalisation comporte en tout 20 mètres de fil de cuivre de 2 m/m de diamètre, elle présentera une résistance de 0,1 ohm (voir les formules de la page 47), lequel 0,1 ohm, traversé par les 5 ampères de notre courant maximum, absorbera 0,5 volt ou 2,5 watts sur 60 ce qui est admissible.

Ce fil choisi, nous le ferons courir en deux conducteurs parallèles (fig. 62) depuis la pile jusque vers les points les plus éloignés où nous désirerons utiliser son action. Les deux conducteurs seront fixés aux murs soit à l'aide de *cavaliers*, clous à deux pointes en forme d'U, soit en les dissimulant sous des *moultures* en bois.

Les deux extrémités des fils étant reliées aux pôles de la pile, la diff. de pot. de 12 volts existe désormais entre deux points quelconques de nos deux conducteurs. Si nous voulons encore la trans-

porter de cette artère principale dans tel endroit qui sera nécessaire, il suffit de dénuder le métal des deux conducteurs séparément et sur une très petite longueur, en a et a' , d'y attacher au moyen d'une pince les extrémités mises à nu de deux autres fils isolés, qu'on y fixe au moyen d'une soudure, ou plus simplement de papier d'étain, pour assurer la netteté du contact. Ceci fait, on recouvre les joints au moyen d'une mince feuille de gutta-percha, puis on dirige ces deux fils, toujours à l'aide de cavaliers ou de moulures, vers l'endroit désiré. Cela s'appelle *prendre une dérivation*.

Dans une installation, il est commode de pouvoir reconnaître sans recherches le fil positif et le fil négatif: aussi, dans la pose des canalisations, s'astreint-on à quelques règles très simples: dans les parcours horizontaux, on place le fil positif au-dessus du fil négatif; dans les parcours verticaux, on le place à gauche. Ainsi, dans la figure 61, l'artère principale et les dérivation numérotées 1 et 2 sont correctement posées, tandis que la dérivation 3 ne l'est pas.

Les boucles b , c , d , du schéma (fig. 62) indiquent que les fils

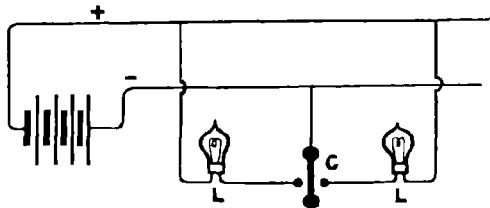


Fig. 63. — Dispositif permettant d'allumer à volonté L ou L'

passent l'un par dessus l'autre sans se toucher métalliquement.

Voilà notre canalisation établie. Il ne nous reste plus maintenant qu'à en tirer parti.

Faisons-en cependant, en passant, ressortir la ressemblance avec une canalisation d'eau: celle-ci a pour but de répartir dans tous les endroits où cela est nécessaire la *pression hydraulique* fournie par un réservoir, pour obtenir un *courant d'eau*; la première est destinée à transmettre en un point quelconque la *pression électrique* fournie par la source pour y produire un *courant électrique*.

Pour utiliser notre canalisation, nous pourrions tout naïvement relier chacune de nos dérivation avec l'une des lampes qu'il s'agit d'alimenter, en intercalant simplement dans le circuit des *interrupteurs* ou *commutateurs* placés à portée de la main et permettant de ne faire fonctionner la lampe que lorsque nous en avons besoin.

Mais si nous voulons un dispositif plus commode, bien préférable en beaucoup d'occasions, nous ferons par exemple en sorte que, lors-

qu'une lampe s'éteint en un endroit, une autre s'allume dans une autre pièce. Le dispositif représenté schématiquement par la figure 62 permettra d'arriver à ce but à l'aide d'un *commutateur à deux directions* C.

S'agit-il, au contraire, de pouvoir allumer ou éteindre à volonté de deux points différents la même lampe, l'examen du schéma de la

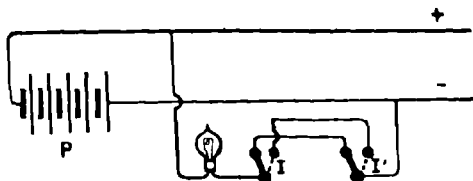


Fig. 64. — Commande d'une lampe de deux points différents.

figure 64 permettra de concevoir comment on peut obtenir aisément ce résultat.

Si enfin, plusieurs pièces d'un appartement étant en enfilade, on veut les traverser successivement en allumant la lampe placée devant soi dans chacune de ces pièces et éteignant celle laissée en arrière, on emploiera utilement le dispositif représenté schématiquement dans la figure 65, au moyen duquel il suffira de pousser successivement dans le *sens de la marche* la barrette de l'interrupteur

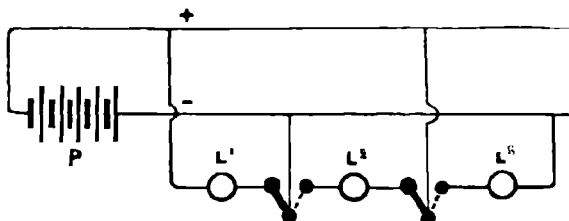


Fig. 65. — Allumage successif de lampes placées dans des pièces en enfilade.

rencontrée à la porte de chacune des pièces traversées. Lorsqu'on reviendra sur ses pas, on fera subir aux commutateurs des déplacements en sens inverse.

Telles sont quelques-unes des combinaisons possibles, qu'avec un peu d'ingéniosité, il sera loisible de varier de cent manières différentes dans chaque cas.

Prix de l'éclairage par piles. — On peut admettre que dans les piles au bichromate bien conçues, le prix du kilowatt-heure — soit 1.000 watts pendant une heure, 50 watts pendant 20 heures, etc., — est d'environ 4 francs.

Chaque bougie représentant une consommation de 3 watts au moins, il en résulte qu'une lampe de 10 bougies, soit 30 watts, absorbant en 33 heures une quantité d'énergie de 1 kilowatt-heure, coûte à alimenter environ 12 centimes par heure. C'est à peu près 6 fois plus que si ces 10 bougies étaient fournies par une lampe à pétrole, en comptant le pétrole à 60 centimes le litre — prix de Paris — c'est encore au moins 4 fois le prix de l'éclairage électrique fourni par les secteurs d'électricité.

A cela près...

CHAPITRE DIXIÈME

ÉLECTROCHIMIE

Nous allons maintenant aborder un ordre de phénomènes qui va singulièrement élargir pour nous le cadre des applications pratiques de l'électricité: je veux parler des phénomènes *électrochimiques*. Nous en avons déjà étudié une application intéressante, celle des piles électriques, mais nous en rencontrerons bientôt une foule d'autres dont la moindre est devenue le point de départ d'industries importantes.

Qu'on en juge: Les *accumulateurs électriques* tiennent une place importante parmi le matériel des stations d'électricité et des tramways à traction électrique. La *galvanoplastie*, l'*argenture*, la *dorure*, le *nickelage* font vivre de par le monde quelques dizaines de milliers d'ouvriers. L'*électrométallurgie*, nouvelle venue, se crée dans l'industrie des métaux une place chaque jour plus considérable. Enfin, la fabrication électrolytique de la soude et du chlore, celle du chlorate de potasse et de vingt autres produits fait trembler sur ses bases la grande industrie chimique elle-même.

De tels phénomènes méritent bien, n'est-ce pas, un peu d'attention?

Nous avons vu — c'est même à l'heure actuelle le plus gros de notre bagage — que les effets chimiques sont capables de produire de l'énergie électrique. Il n'y a donc rien de surprenant à ce que, de son côté, l'énergie électrique soit capable de produire certains effets chimiques. Allons plus loin: disons que si l'union, la combinaison dans une pile de deux ou plusieurs corps nous fournit une certaine quantité d'énergie électrique, en imposant, en fournissant au contraire à cette com-

binaison une quantité d'énergie au moins égale et de même *qualité*, de même tension que celle qu'a dégagée la combinaison pour se faire, elle se *défera*.

On dit dans ce cas qu'on fait une *électrolyse*.

Par exemple, les piles sont *réversibles*, du moins théoriquement ; c'est-à-dire que, si lorsque les produits sont épuisés, on force à passer dans la pile un courant emprunté à une source d'électricité étrangère et de sens inverse à celui qu'elle produisait avant son épuisement, les produits sont ramenés à leur état initial, et la pile est régénérée. Ainsi, dans la pile Daniell, le sulfate de zinc formé est décomposé ; le zinc se dépose sur l'électrode soluble, qui est ainsi remise dans son état initial, tandis que l'acide sulfurique et l'oxygène se portent à travers le vase poreux vers l'électrode positive, dont ils dissolvent le dépôt de cuivre en régé-

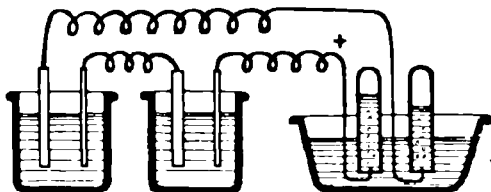


Fig. 66. — Décomposition de l'eau par le courant.

nant le sulfate de cuivre primitif. Pour produire ce courant inverse, on devra naturellement monter la pile épuisée en *opposition* avec une source de f. é. m. *plus grande* en reliant ensemble les pôles de même nom. Nous verrons qu'on a tiré de cette réversibilité des piles un heureux parti dans les *accumulateurs*.

Ceci étant, nous trouverons dès lors naturel que plongeant les deux pôles d'une pile dans de l'eau légèrement acidulée pour augmenter sa conductibilité, cette eau soit *décomposée* (Fig. 66).

L'hydrogène se dégagera au pôle négatif où, si bon vous semble, vous pourrez le recueillir dans une petite éprouvette et l'enflammer ; l'oxygène se rendra de son côté au pôle positif et, recueilli par le même procédé, pourra vous faire mon-

tre de ses petits talents de société en rallumant une allumette dont le bout est encore rouge.

Condition nécessaire pour que l'électrolyse se produise. — Pourtant, faites bien attention ! Cette décomposition de l'eau, si aisée qu'elle paraisse pour le courant électrique, nous ne pourrions pas la réaliser avec un seul élément Daniell. Mieux encore, nous aurions beau prendre toute une batterie d'éléments Daniell couplés en quantité que nous n'en viendrions pas encore à bout !

Cela n'a rien d'étonnant.

Si, comme nous l'avons dit, chaque nature de pile présente une f. é. m. particulière, cela veut dire que chaque réaction chimique spéciale libère l'énergie électrique sous une pression, à un niveau bien déterminé : réciproquement, la combinaison étant formée, nous ne pourrions la décomposer en lui fournissant de l'énergie électrique, que si cette énergie est à un niveau, sous une pression, d'une qualité en un mot, au moins égale à celle qui était fournie lors de la combinaison : elle pourra ainsi lutter victorieusement contre la tendance à la recombinaison des éléments qu'il s'agit de séparer.

Des phénomènes analogues se rencontrent d'ailleurs à chaque pas autre part que dans le domaine de l'électricité, et ils nous semblent alors tout naturels. Ainsi nous pourrions fournir à un morceau de plomb autant de chaleur que nous voudrions sans arriver à le fondre, si cette chaleur n'est pas d'une certaine *qualité*, n'est pas fournie sous un *potentiel calorifique* d'au moins 350 degrés.

En définitive, pour en revenir à la décomposition de l'eau, on voit que l'hydrogène et l'oxygène produisant par leur combinaison une f. é. m. de 1,5 volt, cette eau à son tour exigera pour être *électrolysée* une f. é. m. agissante supérieure à 1,5 volt. Comme on dit, l'eau oppose à l'électrolyse une force *contre-électromotrice* de 1,5 volt (f. c. é. m.)

Et alors, nous comprenons que l'énergie d'une pile Daniell, et même celle de tout un régiment d'éléments Daniell couplés en quantité, étant fournie sous le niveau électrique de 1 volt environ, n'est pas de *qualité* suffisante pour décomposer l'eau : le courant ne passe pas.

Mais prenons au contraire deux éléments Daniell, aussi minuscules que vous voudrez les supposer ; couplons-les en tension, et à leur aide nous décomposerons l'eau avec la plus grande aisance, comme aussi d'ailleurs avec un seul élément au bichromate, dont la *f. é. m.* est de 2 volts.

De même que le courant électrique décompose l'eau, il décompose avec la même facilité les corps les plus énergiquement combinés de la chimie. Il suffit que ce courant soit fourni sous la tension nécessaire pour vaincre la *f. c. é. m.* de chacun, soit 5 à 6 volts au plus.

C'est donc un agent de décomposition d'une puissance merveilleuse.

Ainsi, dans la potasse, le potassium et l'oxygène sont si énergiquement combinés qu'il faut faire appel aux moyens les plus désespérés dont le chimiste peut disposer, aux plus violents feux de forge, pour rompre leur combinaison. Or, ce que le chimiste a tant de mal à réaliser, trois ou quatre modestes éléments de pile permettront à l'électricien de le faire tranquillement. N'en concluez pas malicieusement à la supériorité de l'électricien sur le chimiste, car à notre époque, tout chimiste qui se respecte a dans son âme un... électricien qui sommeille, mais qui, à l'occasion, se réveille et manipule de main de maître les volts et les ampères. — Témoins, M. Berthelot et M. Moissan.

Il n'y a donc rien d'étonnant à ce que ce procédé si puissant de décomposition ait permis de mettre en liberté pas mal de corps simples, d'éléments encore inconnus. C'est ainsi que le potassium, le sodium, le calcium, le baryum ont été vus pour la première fois au pôle négatif d'une pile par le célèbre Davy, qui, lui déjà, était un... croisement accompli d'électricien et de chimiste.

Voici les *f. c. é. m.* de quelques *électrolytes* :

NOM de l'électrolyte	F. c. é. m. en volts	NOM de l'électrolyte	F. c. é. m. en volts
Eau	1,48	Oxyde de cuivre . . .	0,80
Chlorure de sodium.	4,23	Sulfate de zinc . . .	2,28
Chlorure de zinc . . .	2,10	Sulfate de cuivre . . .	1,20
Peroxyde de plomb.	0,26	Sulfure de plomb . . .	0,44

Dans la décomposition des corps composés, les métaux et

l'hydrogène se dirigent vers l'électrode négative tandis que les acides, l'oxygène et, le cas échéant, les *métalloïdes* — chlore, brome, iode, etc., — apparaissent au pôle positif. Ainsi, comme le montre le cas de l'hydrogène, la circulation des produits est ici inverse de ce qu'elle est dans la pile : ceci doit être puisque, nous l'avons dit, un courant de sens *inverse* remet les choses en état dans une pile épuisée, puisque l'électrolyse est le phénomène inverse de la combinaison chimique utilisée dans la pile. On peut remarquer par la même occasion que l'hydrogène et les métaux, qu'il s'agisse de la cuve électrolytique ou de la pile, vont toujours dans le sens du courant, mais que, par contre, les acides et les métalloïdes, tels des écrevisses, vont toujours à rebours (1).

LOIS DE L'ÉLECTROLYSE

Parlons maintenant des lois des actions électrochimiques.

Nous en avons déjà rencontré une, à savoir, que le courant, pour pouvoir traverser un *électrolyte*, doit être produit par une f. é. m. *E au moins égale* à celle de la f. c. é. m. *E'* opposée par cet électrolyte. Si cette condition est réalisée, le courant passe. Sinon, il ne passe pas : Le liquide se comporte alors *comme un véritable isolant*, ce qu'on explique par une action spéciale à la surface des électrodes, action que l'on appelle encore *polarisation*.

Mais supposons que le courant soit dans les conditions nécessaires pour passer et appliquons à son étude le volt-mètre et l'ampèremètre (fig. 67).

Une surprise nous attend.

Si nous avons pris d'abord *E* très peu supérieur à la f. c. é. m. *E'*, le courant était très faible. Si maintenant nous doublons *E*, nous constatons que ce courant devient 5, 10 fois plus grand.

Que signifie cela ? D'après la loi de Ohm, en doublant *E*, nous ne devrions que doubler le courant produit ! Oui, mais voilà

(1) On voit que ce n'est pas encore cela qui peut lever notre incertitude sur le sens *réel* du courant électrique. D'ailleurs, la remarque ci-dessus n'est vraie que si dans une combinaison on a *à la fois* métaux (ou hydrogène) et métalloïdes.

justement le *hic* : la loi de Ohm ne s'applique plus ici. La loi de Ohm n'est applicable à un circuit que si dans ce circuit toute l'énergie fournie par la source se transforme en chaleur, comme c'est par exemple le cas si ce circuit est constitué par une lampe à incandescence. Si, au contraire, une partie de l'énergie disparaît sous une autre forme, la loi de Ohm n'est plus applicable : C'est bien le cas ici puisqu'une partie de l'énergie que nous envoyons à la cuve électrolytique est employée sous forme chimique à décomposer notre électrolyte.

Effectivement, en y regardant de plus près, on voit que dans ce circuit de résistance R soumis à une f. é. m. E le

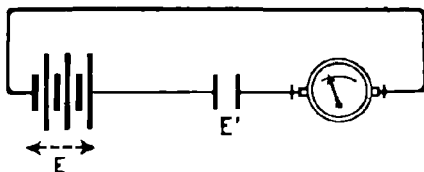


Fig. 67. — Le courant qui traverse le voltamètre croît plus vite que la diff. de pot. courant n'est pas $\frac{E}{R}$ comme le voudrait la loi de Ohm, mais seulement $I = \frac{E - E'}{R}$: c'est-à-dire que nous ne pouvons plus appliquer la loi de Ohm qu'après avoir défalqué de la f. é. m. agissante, la f. c. é. m. opposée par l'électrolyte. Par exemple si la force électromotrice appliquée est 4 volts, la f. c. é. m. 2 volts et la résistance du circuit 4 ohms, l'intensité du courant ne sera que $I = \frac{4 - 2}{4} = 0,5$ ampère. En somme une partie seulement $E - E'$ de la f. é. m. est employée pour vaincre la résistance passive totale du circuit R , tandis qu'une autre partie E' est employée pour défaire la combinaison des constituants de l'électrolyte.

Mais cette décomposition exige un certain travail? Oui assurément, et nous allons bien voir lequel.

Comme notre pile débite toujours dans le circuit le courant I sous la pression E , peu lui importe ce qu'il y a dans ce circuit, elle développe toujours une puissance EI . Or, dans ce circuit il ne se dépense sous forme de chaleur que RI^2 (Voir page 58), que nous pouvons mettre sous la forme

$$RI \times I = R \frac{E - E'}{R} \times I = (E - E') I.$$

Comme la pile fournit EI , qu'une partie seulement $(E - E')I$, ou $EI - E'I$, disparaît en chaleur, il faut bien que ce qui manque à l'appel, c'est-à-dire $E'I$, ait été absorbé sous une autre forme. C'est en effet ce qui a été employé sous forme chimique pour provoquer la décomposition de l'électrolyte.

Sans plus tarder, faisons une remarque importante.

L'énergie fournie par la source d'électricité au voltamètre se divise, d'après ce qui précède, en travail chimique et en travail d'échauffement.

Nous tirons immédiatement de là que pour avoir dans un circuit électrolytique un bon rendement en travail chimique, il faudra que les pertes par échauffement dans les résistances passives soient aussi faibles que possible, c'est-à-dire que ces résistances passives soient réduites au minimum.

Mais que signifie cette expression, chercher un bon rendement chimique ? Cela se traduit d'une façon terre à terre en disant que nous voulons, à l'aide d'une dépense donnée d'énergie électrique, décomposer le plus possible de l'électrolyte, par exemple, déposer le maximum de cuivre si nous nous occupons de *galvanoplastie*.

Or, qu'est-ce que c'est, ce plus possible ? C'est bien simple : un certain poids de deux ou plusieurs corps, en se combinant, dégage toujours une même quantité d'énergie, bien déterminée par les chimistes. Si donc nous fournissons au corps résultant de la combinaison, sous forme électrique, une quantité d'énergie précisément égale, sous la tension nécessaire, tout ce que pourra faire cette énergie, ce sera évidemment de redécomposer la totalité de la combinaison : elle n'en pourrait pas décomposer davantage, mais au contraire, elle en décomposera en réalité toujours moins, parce que toujours elle rencontrera des causes de pertes qui diminueront le rendement.

Ainsi, dans un circuit électrolytique, une quantité d'énergie électrique donnée décompose au maximum un certain poids d'un électrolyte déterminé, poids qui d'ailleurs dépend de la nature dudit électrolyte ; *par unité de temps*, nous électrolysons une quantité de matière proportionnelle à la puissance dépensée sous forme chimique, soit $E'I$. Mais E' est, nous l'avons vu il n'y a qu'un instant, une quantité fixe pour

un électrolyte donné, de sorte qu'en définitive, la quantité de substance qui se dépose aux électrodes dépend de I et d'un certain coefficient k , l'*équivalent électrochimique*, variable avec chaque corps et dépendant de son équivalent chimique. Quant à la quantité *totale* de matière déposée au bout d'un certain temps, on voit qu'elle dépend, comme nous l'avions annoncé il y a longtemps (voir page 26), de la *quantité d'électricité* $I \times T$ (1) qui pendant ce temps T a traversé le circuit. Comme l'unité de quantité dont nous avons parlé, le coulomb, est trop petit en pratique, on se sert en général de l'*ampère-heure*, quantité d'électricité transportée en une heure ou 3.600 secondes — et non plus en une seconde — par un courant d'un ampère. L'ampère-heure équivaut donc à 3.600 coulombs.

Voici les quantités de différents corps mises en liberté par le passage de 1 ampère-heure :

NOM de l'élément libéré	POIDS libéré en grammes	NOM de l'élément libéré	POIDS libéré en grammes
Hydrogène	0,03738	Cuivre	1,17700
Potassium	1,45950	Mercure	3,73450
Sodium	0,85942	Fer (ferreux)	1,04480
Aluminium	0,34018	Nickel	1,09530
Argent	4,02500	Zinc	1,21330

Répetons que ces différents nombres sont intimement liés aux équivalents chimiques des éléments correspondants.

ÉLECTROLYSE A ANODE SOLUBLE

Nous avons vu que toute électrolyse absorbe une certaine diff. de pot. qui dépend uniquement de la f. c. é. m. de l'électrolyse. Ceci suppose cependant que les électrodes sont inatta-

(1) Ne pas confondre *quantité d'électricité*, produit de l'intensité par le temps, avec *quantité d'énergie électrique* ou *travail électrique*, qui, nous l'avons fait remarquer lors de notre comparaison avec une chute d'eau, représente le produit de la puissance électrique par le temps.

quables par les produits de l'électrolyse, comme c'est par exemple le cas si ces électrodes sont en platine ou en charbon. Mais il n'en est plus ainsi si les électrodes, si en particulier l'électrode positive est attaquée, car alors, il y a là une source d'énergie étrangère qui vient renforcer les résultats dus à la source.

Supposez par exemple que nous employions comme électrolyte une dissolution de sulfate de cuivre et comme électrode positive plongeant dans ce liquide une lame de cuivre. Que va-t-il se passer ?

Au contact de l'électrode reliée au pôle négatif, dont la nature, elle, importe peu, le sulfate de cuivre est décomposé comme nous l'avons dit. Le cuivre se dépose sur l'électrode en une couche d'épaisseur progressivement croissante. Cette première action, décomposition du sulfate de cuivre, nécessite une dépense d'énergie et se fait, conformément aux explications précédentes, moyennant l'absorption d'une partie 1,20 volt de la f. é. m. agissante et au taux de 1,18 gr. de cuivre déposé par ampère et par heure.

Mais ceci n'est qu'une des parties du phénomène, car de leur côté, l'acide sulfurique et l'oxygène mis en liberté par l'abandon du zinc se dirigent vers l'électrode positive. Là ils rencontrent du cuivre qui, conformément aux lois de la migration des métaux, voudrait bien aller lui aussi vers l'électrode négative, mais que sa *solidité* attache au rivage. Qu'à cela ne tienne ! L'acide sulfurique et l'oxygène apportent justement au cuivre de quoi prendre à l'état de sulfate de cuivre la forme liquide qui sera le mode de *véhiculage* rêvé, de sorte qu'à son tour le cuivre de l'électrode positive pourra se diriger vers l'autre électrode et s'y déposer.

Donc, si au pôle négatif il y avait destruction de sulfate de cuivre, au pôle positif, au contraire, il y a formation de ce même sulfate en quantité justement égale ; si la première absorbait de l'énergie, la seconde nous en restitue précisément autant ; si la première, source de f. c. é. m, absorbait une portion de la f. é. m. agissante, la seconde, source de f. é. m. rend à cette f. é. m. agissante ce qu'elle avait perdu. En résumé, tout se borne donc à un transport de métal de l'électrode positive (ou *anode*) à l'électrode négative (ou *cathode*),

transport effectué *sans dépense d'énergie* autre que celle qui est absorbée par les résistances passives, et sans que la composition du bain subisse la plus petite modification.

On verra quel parti on a su tirer de ces caractères si intéressant de l'électrolyse avec *anode soluble* dans la galvanoplastie et dans le raffinage électrique des métaux.

RÉSUMÉ

De même que l'énergie chimique est capable de produire des effets électriques, réciproquement l'énergie électrique peut provoquer des effets chimiques. Si on soumet un corps composé, ou *électrolyte*, à l'action d'une diff. de pot. au moins égale à la *force contre-électromotrice* de cet électrolyte, il est décomposé, *électrolysé*. Plusieurs corps simples de la chimie ont été découverts à l'aide de ce puissant moyen d'action.

Cette électrolyse est caractérisée par l'absorption sous forme chimique d'une partie $E'I$ de la puissance fournie par la source, en appelant E' la f. c. é. m. de l'électrolyte considéré. La quantité de matière électrolysée à chaque instant dans un circuit dépend donc en réalité de la *puissance* absorbée sous forme chimique $E'I$, mais comme la f. c. é. m. est une valeur constante pour un électrolyte donné, on peut dire que cette quantité électrolysée à chaque instant dépend de I , c'est-à-dire du courant. La quantité *totale* de produit électrolysé au bout d'un certain temps dépend ainsi de la *quantité d'électricité* qui a traversé le circuit pendant ce temps, quantité qu'on exprime généralement en *ampères-heures*, le coulomb étant trop petit en pratique.

Si les deux électrodes sont en métal identique et plongent dans une solution de ce même métal, l'énergie absorbée à la *cathode* pour la décomposition du se lest restituée à l'*anode* par la dissolution du métal, et tout se borne à un *transport de métal* de l'une à l'autre électrode, transport effectué presque *sans dépense d'énergie*. Cette action est mise à profit en galvanoplastie et en électrométallurgie.

CHAPITRE ONZIÈME

APPLICATIONS DE L'ÉLECTROCHIMIE

LES ACCUMULATEURS ÉLECTRIQUES

Je suppose — la supposition n'a rien de désobligeant — que vous soyiez l'heureux propriétaire d'une chute d'eau.

Pas le Niagara à coup sûr.

Votre chute se présente sous les auspices d'un maigre filet d'eau tombant à regret de quelques mètres de hauteur et rentre de plein droit dans la catégorie des chutes que nous avons qualifiées de chutes de *faible puissance*.

Mais on veut toujours paraître plus riche que l'on n'est. Le désir vous hante de faire produire à votre chute un effet hydraulique imposant, grandes eaux donnant vaguement l'impression de Versailles ou mise en mouvement d'une turbine puissante. Comment faire ?

Evidemment, au lieu de laisser s'écouler continuellement le minuscule filet d'eau qui ne peut servir à rien, vous allez le diriger dans un réservoir où le liquide s'accumulera petit à petit, puis, au moment de produire votre effet, vous lancerez en épaisses cataractes le contenu du réservoir vers votre cascade ou sur les aubes de votre turbine.

Ainsi, à l'aide de cet artifice, en accumulant pendant un temps très long l'énergie que vous apportez miette par miette votre chute, puis en la dépensant en un temps très court sous forme d'une puissance plus grande, vous avez changé les caractères de la chute : vous lui avez permis de rendre des services qu'elle n'eût pu rendre sans cela ; en un mot, vous lui avez donné une valeur.

Vous concevez que le même problème se pose en électricité avec le même intérêt. Les sources d'électricité que vous connaissez jusqu'à présent, les piles, sont des outils d'assez faible puissance. Par contre, elles peuvent marcher pendant un temps très long, même la

nuit, sans qu'on ait à s'en occuper; mais malheureusement, on n'a généralement besoin d'elles que quelques instants, quelques heures au plus chaque jour. Il y aurait donc intérêt à les faire fonctionner continuellement et à recueillir leur énergie dans un appareil susceptible de l'emmagasiner et de la rendre en un temps beaucoup plus court, à l'avantage de la grandeur des effets produits. On utiliserait ainsi beaucoup mieux la batterie et, comme tout-à-l'heure « votre » chute, on la rendrait capable de produire des effets dont, laissée à ses seules forces, elle eût assurément décliné la responsabilité.

Or, de tels réservoirs existent. On ne s'est pas foulé pour leur donner un nom et on les appelle des *accumulateurs électriques*. D'ailleurs, vous avez pu le remarquer, les électriciens sont la sobriété même sur le terrain des noms de baptême et ne cherchent pas — Dieu merci! — à battre un record que les médecins tiennent à conserver.

J'ai voulu vous montrer, en vous parlant des piles, la raison d'être des accumulateurs électriques. Mais il ne faudrait pas croire qu'ils sont confinés dans la maison de l'amateur électricien. Tant s'en faut. C'est là le moindre de leurs débouchés, et en eux nous abordons pour la première fois des outils vraiment industriels, dont la place est marquée à l'*usine* de production de l'énergie électrique.

Les usines d'électricité des villes, à l'époque actuelle, ont comme tâche principale de fournir la lumière aux habitations avoisinantes, auxquelles elles sont reliées électriquement par une canalisation *aérienne* ou *souterraine*.

Un matériel très coûteux : chaudières, machines à vapeur, dynamos, est, dans ces usines, consacré à la production de l'énergie électrique. S'il était réduit à ses propres forces, il ne serait utilisé que pendant la partie de la journée où les *abonnés* du réseau ont besoin de lumière. Pendant tout le reste du temps, il resterait inutilisé. Or, à cette inaction regrettable, on peut substituer une utilisation bien plus parfaite, une marche interrompue seulement quelques heures par jour pour les besoins de l'entretien des machines, en employant les dynamos à charger des accumulateurs, qui, la nuit venue, déverseront dans la canalisation toute l'énergie — sauf les pertes — qu'ils auront absorbée. On peut alors suivant les cas, ou bien réduire dans une mesure considérable la puissance de la machinerie, c'est-à-dire son prix, puisque les accumulateurs condensent sur quelques heures l'effort prolongé demandé au matériel; ou bien augmenter le nombre des abonnés, puisqu'on est en mesure de leur fournir au moment psychologique, grâce à la réserve des accumulateurs, beaucoup plus d'énergie.

L'existence des accumulateurs est ainsi justifiée : préoccupons-nous maintenant de savoir ce que sont ces appareils.

PRINCIPE DES ACCUMULATEURS

Effectuons, l'électrolyse de l'eau acidulée à l'aide de deux électrodes en *plomb* A et B placées en regard (fig. 68). Nous observons qu'avec ces électrodes, les gaz *ne se dégagent pas* pendant un temps assez long. Ils restent, ils s'accumulent sur les deux électrodes qui se recouvrent d'une couche noire du côté de l'hydrogène, d'une couche brune du côté de l'oxygène. Nous reconnaissons-là notre vieille ennemie la *polarisation* ! Mais ici, ce n'est plus une ennemie.

Bien au contraire comme vous l'allez voir.

Relions aux deux bornes d'un ampèremètre (fig. 69) les fils de jonction de nos électrodes polarisées. Nous constatons le passage

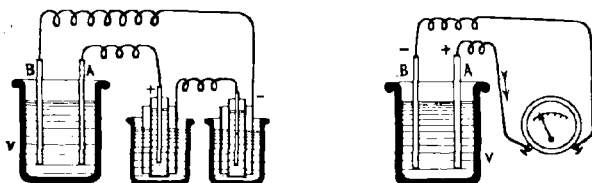


Fig. 68 et 69. — Principe des accumulateurs.

d'un courant énergique allant vers l'ampèremètre de la lame qui était reliée au pôle +. Eh oui ! lorsque nous fermons le circuit, l'hydrogène et l'oxygène accumulés sur les électrodes s'empressent de se recombiner et nous restituent par leur combinaison l'énergie que la pile avait fournie pour la décomposition.

Nous avons donc *accumulé* dans notre système sous une forme aisément restituable, une partie de l'énergie fournie par la pile, et il ne suffira que de savoir s'y prendre pour rendre très grande cette accumulation.

Naturellement, de même que l'énergie fournie par la pile l'avait été sous un potentiel de 1,5 volt, 1,5 volt étant la f. é. m. de polarisation de l'eau, de même elle doit être restituée sous un potentiel de 1,5 volt. Pourtant, si nous mesurons la f. é. m. de notre *pile secondaire*, comme on l'appelle, nous la trouvons égale à 2 volts au moins. Par contre, il a fallu aussi en réalité la *charger* avec une source de plus de 2 volts.

Cette anomalie tient à ce que les phénomènes ne sont pas aussi simples que nous venons de l'expliquer et se compliquent de la présence du plomb et de celle de l'acide sulfurique.

On *sait* qu'il se forme à la charge une couche de peroxyde de plomb du côté où l'oxygène se dégage (pôle +) et une couche de plomb réduit du côté de l'hydrogène (pôle -). On *croit* qu'à la décharge l'oxygène de la lame positive et l'acide du liquide se portent vers la lame négative dont ils sulfatent le plomb tandis qu'à l'autre lame, le peroxyde de plomb, transformé en protoxyde par le départ de l'oxygène, est également sulfaté.

Ce serait cette double sulfatation qui produirait le courant.

Quant au sulfate ainsi formé, il serait, lors du passage du courant de charge, d'une part électrolysé sur la plaque négative et ramené alors par l'afflux d'hydrogène à l'état de plomb réduit, d'autre part transformé progressivement en peroxyde de plomb à la lame positive par suite de l'afflux de l'oxygène. Ce qui vérifie cette hypothèse, c'est que la richesse du liquide en acide sulfurique augmente progressivement au fur et à mesure de la charge et diminue au contraire pendant la décharge.

Mais ce n'est malgré tout qu'une hypothèse approximative, et la théorie de l'accumulateur, vraie bouteille à l'encre, est encore pour nos savants l'occasion de nombreuses prises de becs — becs de plumes, s'entend !

C'est Gaston Planté qui a constaté en 1860 cette action curieuse des électrodes de plomb et qui a vite compris le parti qu'on pourrait en tirer au point de vue de l'accumulation. Il a en effet, par des dispositifs spéciaux, réussi à rendre très grande l'action des gaz sur les électrodes, cette action se faisant d'ailleurs d'une façon très particulière qui n'aggrave pas la résistance intérieure.

Cette dernière, au contraire, peut être réduite à l'extrême limite par l'emploi d'électrodes très rapprochées, de très grande surface, et on dispose alors d'une source tenant en réserve une quantité considérable d'énergie, qu'elle peut restituer sous une intensité très grande. Nous retrouvons là l'équivalent de notre réservoir hydraulique avec toutes ses qualités.

Accumulateur Planté. — L'accumulateur Planté, sous sa forme classique (fig. 69), se compose d'un vase en verre rempli d'eau acidulée sulfurique, dans lequel plonge une double spirale constituée par les deux électrodes de plomb roulées ensemble et maintenues à quelques millimètres l'une de l'autre par deux bandes de caoutchouc. On réalise de cette façon le maximum de surface d'électrodes compatible avec un vase donné.

Mais si les deux électrodes étaient en plomb non modifié, elles ne pourraient suffire à constituer un accumulateur pratique : leur faculté d'absorption des gaz serait trop faible, et après quelques instants de charge, on verrait ces gaz se dégager sous forme de bulles, aux dépens de l'énergie fournie. Il faut donc faire en sorte d'augmenter la capacité de ces électrodes, et c'est à ce résultat que M. Planté est arrivé à l'aide d'une curieuse opération à laquelle il a donné le nom caractéristique de *formation* des plaques (fig. 70).

Cette formation consiste à faire passer pendant très longtemps un courant intense à travers l'accumulateur, en inversant le sens de ce courant chaque fois que des bulles de gaz commencent à se dégager abondamment aux électrodes. A chaque circulation de courant dans un sens donné, l'oxygène se dégageant sur l'une des électrodes forme avec le plomb une couche brune de peroxyde de plomb, tandis que sur l'autre électrode, l'hydrogène réduit la couche d'oxyde précédemment formée, la transformant en une couche noire

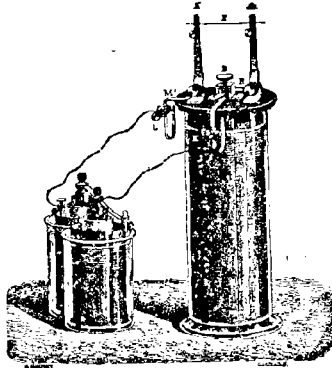


Fig. 70. — Accumulateur Planté sous sa forme primitive [formation

de plomb spongieux qui, lorsqu'on fait débiter l'accumulateur, est facilement attaquée par l'acide sulfurique et l'oxygène venant de l'électrode positive. A l'inversion suivante, l'oxygène réoxyde très aisément le plomb spongieux, puis il attaque en outre légèrement la couche sous-jacente de plomb cohérent. L'épaisseur de la couche attaquée augmente donc petit à petit à chaque opération, de sorte que la *capacité* de l'accumulateur augmente graduellement.

Après quelques mois de ce laborieux *défrichage*, on dit que l'accumulateur est formé. Alors qu'au début les gaz se dégageaient après quelques instants de charge, ils n'apparaissent plus maintenant, après avoir saturé les deux couches, qu'après une charge prolongée plusieurs heures. L'instrument est maintenant un outil industriel, capable d'emmagasiner par kilogr. d'électrodes plusieurs

ampères-heures. Mais quel instrument coûteux, si l'on en juge par ce que nous avons dû dépenser de temps et de courant pour sa formation !

Aussi, on juge de la satisfaction de M. Planté quand il s'aperçut de la possibilité de réduire le temps de la formation au tiers ou au quart de ce qui était auparavant nécessaire, en faisant préalablement baigner pendant 48 heures les électrodes dans de l'acide azotique étendu. Il y avait sans doute là une sorte de ramollissement de la surface du métal qui rendait moins pénible sa pénétration ultérieure.

Accumulateurs Faure. — Aujourd'hui, même perfectionnée de cette façon, la formation Planté est complètement passée de mode. On utilise maintenant d'une manière générale une idée fort simple due à M. Faure.

Au lieu de s'escrimer à former sur des plaques qui y mettent tant de mauvaise grâce une couche imperceptible d'oxyde ou de plomb spongieux, on recouvre tout bonnement ces plaques d'oxyde artificiel, puis on fait passer le courant. La couche du pôle + est peroxydée, celle du pôle — est transformée en plomb spongieux et du coup, l'accumulateur est formé. L'œuf de Christophe Colomb ! Mais il fallait le trouver, et la preuve, c'est que l'accumulateur Planté date de 1860, alors que « l'éclair de génie » de M. Faure est de vingt et un ans plus jeune.

Et notez que par-dessus le marché, nous pouvons mettre la couche d'oxyde aussi épaisse que nous voulons, tandis que celle de Planté avait bien du mal à décrocher le dixième de millimètre. Aussi la capacité des accumulateurs Faure est-elle bien plus grande.

Il ne faudrait pourtant pas croire qu'on peut aller indéfiniment dans cette voie de l'augmentation d'épaisseur de la *matière active*, car celle-ci n'est pas très conductrice du courant; en outre, surtout au pôle positif, elle *foisonne* à la charge comme à la décharge et peut déterminer par sa chute des court-circuits regrettables.

Aussi, la lutte entre les différents accumulateurs se résume-t-elle principalement aujourd'hui à assurer la solidité de la couche de matière active en l'englobant en *pastilles* dans un squelette, une âme métallique munie de griffes ou de rainures savamment combinées.

D'ailleurs, la forme en spirale des électrodes de Planté est complètement abandonnée; elle est remplacée par la forme en *plaques* alternativement positives et négatives, toutes les plaques de même nom reliées par un conducteur commun, muni d'une prise de courant (fig. 71 et 72).

Quelquefois, comme dans les *Fulmen*, on empêche la chute de matière active en mettant entre les plaques successives un grillage de celluloid. Dès 1881, M. Faure avait eu une idée analogue, mais il employait du drap.

Mais somme toute, si la matière active de Faure a de grands avantages, ce ne sont pas les inconvénients qui lui manquent! Elle n'a pas les qualités de durée et de solidité de la couche microscopique des Planté. Aussi, peut-on constater en ce moment une sorte de réaction contre la « pastille » et un retour vers les idées de Planté, qu'on s'efforce simplement de mieux mettre à profit en portant à l'extrême limite la surface des électrodes, comme compensation à la profondeur. L'accumulateur à *navettes* de Blot, dont la fig.72 reproduit l'une des plaques, et l'accumulateur *Union*, à plaques négatives genre

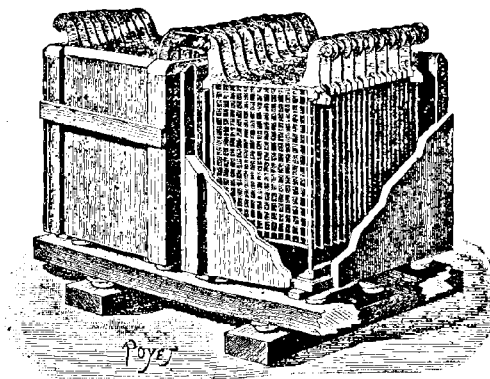


Fig. 71. — Accumulateurs de la Société pour le travail électrique des métaux

Faure, à plaques positives genre Planté, sont, de cette tendance, les plus intéressants résultats à l'heure actuelle.

Défauts des accumulateurs actuels. — Ce curieux exemple de recommencement des choses d'ici-bas prouve bien que l'on n'est pas encore satisfait de l'accumulateur actuel, que ce n'est pas encore un outil bien fameux.

Effectivement, les accumulateurs dont la capacité est actuellement la plus grande, ceux du type *Fulmen*, donnent au grand maximum 15 ampères-heures par kilogr. de poids total, soit 30 watts-heures puisque le courant est fourni sous la tension de 2 volts. Or, si l'on en conclut le poids réellement utile — c'est-à-dire le poids du sulfate de plomb formé — on trouve que ce poids est de l'ordre des centièmes du poids total. Il y a donc plus de 95 de poids inutile pour 4 ou 5 seulement de poids réellement utile! L'électrode de plomb qui sert de simple support aux gaz, est en effet un impe-

dimentum bien lourd, mais le malheur est qu'un autre métal plus léger ne saurait actuellement la constituer.

Aussi, l'accumulateur actuel est environ *cinquante fois* moins efficace au point de vue de la quantité d'énergie utilisable sous forme mécanique que le pétrole, *trente fois* moins que le charbon ! Ce qui n'a pas empêché certaines gens de proposer sérieusement le remplacement du charbon par des accumulateurs à bord des paquebots ! Tous les records sont bons à décrocher, paraît-il, même celui de l'absurde...

En outre de ce faible emmagasinement, l'accumulateur n'échappe pas au sort commun des sources d'électricité. Il présente une certaine résistance intérieure, quoique très faible. Donc, à la charge, une partie de l'énergie fournie est absorbée dans cette résistance intérieure ; une autre est perdue également à la décharge, tant dans

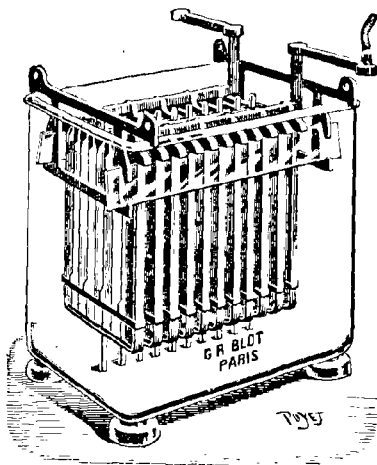


Fig. 72. — Accumulateur Blot.

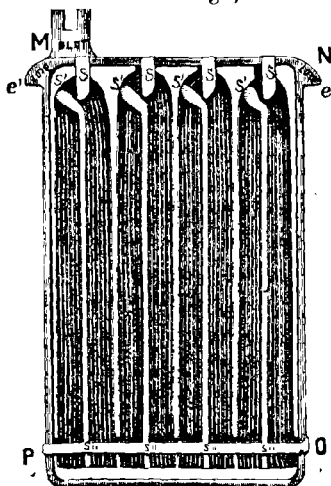


Fig. 73. — Détails d'une plaque.

les accumulateurs eux-mêmes que dans les appareils d'utilisation.

Enfin, dans l'intervalle qui sépare la charge de la décharge, une petite partie de l'hydrogène et de l'oxygène se recombinent.

Pour toutes ces raisons, le rendement des accumulateurs n'est pas excellent — surtout si charge et décharge sont rapides. Même avec de grandes batteries comme celles qu'on emploie dans les stations centrales, on peut s'estimer très heureux quand il atteint 80 0/0 ; et on n'est pas surpris outre mesure quand il est de 60...

Pas surpris — mais pas plus satisfait pour cela, certes — ; et il faut espérer, pour le bon renom de l'électricité, qu'on n'en restera pas là et que l'accumulateur au plomb ne sera pas éternel.

Mais cet espoir est-il justifié? Oui. La théorie l'autorise pleinement.

Nous savons que toutes les actions électrolytiques sont en principe réversibles; un électrolyte quelconque décomposé par le courant, fournit en général des quantités énormes d'énergie lorsque ses éléments se ressoldent : 200, 500, 1000 watts-heures par kilogr. On saura sans doute quelque jour utiliser certaines de ces actions dans des conditions incomparablement meilleures que celles que nous fournit l'immuable type *plomb-plomb* actuel. On a déjà essayé dans cet ordre d'idées, mais sans résultats nettement définis, des accumulateurs au cuivre⁴ au zinc, au cadmium. Attendons.

Emplois des accumulateurs. — Néanmoins, à défaut d'autre chose, les accumulateurs rendent de précieux services.

Indépendamment de leur faculté d'emmagasinement qui permet une meilleure utilisation du matériel des stations centrales (Voir page 127), ils présentent une résistance intérieure très réduite, quelques millièmes d'ohm dans les grands éléments. Ceci explique bien la faveur de leur emploi comme *volant* dans les stations centrales. Pendant les heures d'éclairage, la batterie, chargée le reste de la journée, est placée en dérivation sur les dynamos et alimente le réseau concurremment avec elles. On obtient ainsi un ensemble qui présente une résistance intérieure extrêmement faible, et lorsque la demande de courant augmente, c'est la batterie qui paré à cette demande sans que le potentiel baisse sensiblement.

C'est un rôle analogue, en plus de son rôle d'accumulateur proprement dit, que la batterie joue dans l'installation d'éclairage de l'amateur, où elle est en dérivation sur la pile qui la charge constamment. Si l'on vient à faire varier le débit, par suite de l'allumage ou de l'extinction de quelques lampes, la résistance intérieure de l'ensemble pile-accumulateurs étant très faible, les variations de la diff. de pot. sont insensibles, pour le plus grand bien de la fixité de l'éclairage.

Charge et manipulation. — Suivant l'état de charge des accumulateurs, leur diff. de pot utile en débit varie entre 2 et 1,8 volt par élément. Quand cette diff. de pot. atteint 1,8 volt, c'est que la charge est à peu près épuisée.

Pour charger une batterie, il faut disposer d'une f. é. m. d'au moins 2,5 volts par élément en série. On effectue cette charge en reliant les pôles de la source (préalablement mise en marche si c'est une dynamo) aux pôles de même nom de la batterie d'accumu-

lateurs. On doit intercaler un ampèremètre en circuit et on verra à ne pas dépasser un régime de charge supérieur à 1 ampère par kilogr. d'électrodes.

Dans le cas où on ne pourra pas disposer d'une f. é. m. assez élevée pour charger tous les éléments en série, on en fera 2 ou 3 séries égales qu'on couplera, pour la charge, en quantité. Ainsi, par exemple, on pourra charger à l'aide de 6 éléments au bichromate ($E = 12$ volts) 8 accumulateurs montés par 4 en tension et 2 en quantité. On disposera ainsi, en effet, de 3 volts par accumulateur. La charge terminée, ce qu'on reconnaîtra au dégagement abondant des gaz, on couplera les accumulateurs en tension pour alimenter la canalisation.

Si la diff. de pot. entre les bornes d'un des accumulateurs vient à s'annuler, ce dont un examen judicieux passé de temps en temps à l'aide du voltmètre permettra de se rendre compte, il y aura de fortes présomptions pour un court-circuit causé par la chute d'une pastille ou le non-parallélisme des plaques.

Enfin, en ce qui concerne la charge et surtout la décharge, il y aura lieu de ne pas soumettre les accumulateurs à pastilles à des régimes exagérés, dépassant 1 à 2 ampères par kilogramme de plaques, afin d'éviter le *gondolement* de celles-ci.

Quand une batterie d'accumulateurs se gondole, il n'y a pas à rire!

GALVANOPLASTIE ; DÉPÔTS ÉLECTROCHIMIQUES

Galvanoplastie. — Nous avons vu que si l'on électrolyse une solution d'un sel métallique en employant comme anode une plaque du même métal qui se trouve en dissolution dans le *bain*, le passage du courant provoque le transport continu du métal de l'anode vers la lame métallique constituant la cathode.

Ceci ne paraît pas vous dire grand'chose.

A quoi bon, dites-vous, enlever du métal sur cette plaque et l'amener sur cette autre? C'est certainement très fort comme exercice, mais cela ne nous sert pas à grand'chose. Effectivement, mais il n'est pas très difficile de modifier un peu les conditions de l'expérience de manière que cela nous soit, au contraire, extraordinairement utile.

D'abord, cette électrode négative, nous savons que sa nature importe peu; elle sera uniformément recouverte d'une couche de métal graduellement croissante pourvu qu'elle soit constituée par

une matière conductrice. Or, elle peut être en gutta-percha et satis faire tout de même à cette condition de conductibilité si sa surface a été frottée, *métallisée*, à l'aide d'un pinceau imbibé de plombagine en poudre. Et du moment que notre électrode est en gutta-percha, rien ne nous aura empêchés, avant le passage à la plombagine, de prendre avec cette gutta préalablement ramollie dans l'eau chaude l'empreinte d'une médaille, d'une pièce de monnaie, etc.

Ah! vous comprenez, maintenant : vous comprenez que nous aurons encore *tout simplement* transport d'une certaine quantité du métal de l'anode sur notre cathode en gutta, mais que par dessus le marché, le métal déposé se sera incrusté dans notre moule, en aura reproduit tous les détails avec la plus scrupuleuse fidélité, de sorte qu'en dépouillant le métal du moule, auquel la plombagine l'empêche d'adhérer, nous obtiendrons une magnifique reproduction de notre médaille, et cela en quelque sorte *gratis pro deo*, puisque, théoriquement, ce résultat qui tient du merveilleux ne nous coûte pas d'énergie (page 122).

Quant au moule, il sera *tout prêt* à nous fournir autant de nouveaux exemplaires que nous en désirerons.

Telle est la *galvanoplastie* ; et comme le hasard joue fort souvent un grand rôle dans l'histoire de la science, il est bien probable que l'observation du dépôt de cuivre de la pile Daniell, reproduisant fidèlement les éraillures de l'électrode positive, n'a pas été étrangère à la découverte annoncée par Jacobi en 1838.

La galvanoplastie se pratique en général avec une solution saturée de sulfate de cuivre, additionnée d'un peu d'acide sulfurique et placée dans une cuve de verre.

L'anode est une plaque de cuivre d'une grandeur un peu supérieure à la surface du moule. C'est généralement de la gutta-percha qui constitue celui-ci, mais très souvent aussi, on prend l'empreinte avec de la stéarine, de la gélatine, de l'alliage fusible de Darcet. L'épreuve obtenue, préalablement plombaginée, est suspendue dans le bain par un fil de cuivre qui en entoure le contour, et qui est mis en relation avec le pôle négatif de la source. Le cuivre commence à se déposer dès que le circuit est fermé.

Les qualités de beauté et de solidité du dépôt dépendent essentiellement de la conduite du bain, un courant trop intense produisant un dépôt noir, tandis qu'un dépôt trop lent est cristallin et cassant. Il faut en outre que le bain soit fréquemment agité pour conserver pendant toute la durée de l'opération une homogénéité nécessaire.

Quant à la source d'électricité, elle n'a pas besoin d'être à f. é. m.

élevée, puisque nous savons qu'elle n'a à vaincre que les résistances passives du circuit. Sa principale qualité doit être la constance, l'opération se prolongeant pendant plusieurs heures. La pile au sulfate de cuivre, genre Daniell, satisfait fort bien à ces conditions.

On peut également recommander la pile au bichromate à deux liquides.

Mais si intéressants que soient les résultats obtenus pour la reproduction des médailles, ce sont là enfantillages pour les galvanoplastes d'aujourd'hui, qui s'attaquent à des problèmes bien plus difficiles, comme la reproduction en une seule pièce de statues de dimensions respectables et du plus bel effet artistique.

Les applications de la galvanoplastie à d'autres industries ne sont pas moins intéressantes. Par exemple, elle apporte aux procédés de la gravure des ressources précieuses :

Rien de plus simple que de transformer en un cliché prêt au tirage un dessin tracé par la pointe du graveur sur la cire recouvrant une planche de cuivre. On porte la plaque dans le bain de sulfate de cuivre en la reliant au *pôle positif* : elle joue donc ici le rôle d'anode ; le métal se dissout partout où la pointe de l'artiste l'a mis à nu et le dessin tracé sur la cire est bientôt représenté en creux dans le cuivre de la façon la plus fidèle.

C'est d'une façon analogue que l'on applique la galvanoplastie aux gravures sur bois. Autrefois on tirait les épreuves sur le bois lui-même : cela ne pouvait durer longtemps et le cliché était vite hors d'état. Maintenant, on coule sur le bois de la gutta-percha, qui reproduit la gravure dans ses détails les plus ténus, puis on fait un dépôt galvanoplastique que l'on consolide en y coulant un alliage approprié. On obtient ainsi un cliché, reproduction exacte du bois, mais beaucoup plus dur ; il permet de tirer sans difficulté jusqu'à 80.000 épreuves. Si ce cliché vient cependant à s'user lui aussi, le bois est toujours là pour permettre d'en refaire de nouveaux.

La fidélité de reproduction des procédés galvanoplastiques est si extraordinaire, au reste, que l'on transpose à leur aide sur des clichés d'imprimerie les vues photographiques les plus délicates.

Dorure, argenture, nickelage. — Mais nous pouvons demander à notre courant véhiculeur de particules métalliques, je ne dirai pas *mieux*, mais bien d'autres choses encore.

Nous pouvons par exemple, lui demander d'exercer ses effets sur la solution d'un sel d'or. Si alors nous suspendons à la cathode les objets métalliques ou métallisés les plus vulgaires, cuillers, fourchettes, cristaux, l'anode étant constituée par une plaque d'or, le

métal précieux viendra recouvrir ces objets d'une couche brillante et trompeuse. Telle est la *dorure* galvanique, le moyen le plus sûr qu'on connaisse jusqu'à présent — en dépit de tous les *argentaurums* du monde — pour muer en or du fer ou de l'étain.

Il est vrai que cet or n'est même pas du *doublé*, car le prix du métal déposé sur la cuiller à café de l'aspect le plus riche ne dépasse guère... 35 centimes.

Mais par exemple, considérable est le travail, multiples sont les précautions nécessitées par la dorure et le prix de l'or n'est qu'un bien faible facteur devant celui de la manipulation :

Les objets à dorer doivent tout d'abord être débarrassés de la couche de graisse qui les recouvre toujours — rappelez-vous l'aiguille *nageuse* de notre boussole — et qui s'opposerait à l'adhérence et même au dépôt de l'or. On les plonge d'abord dans une solution de soude, puis dans l'eau pure, ensuite dans un bain acide, dit bain de *dérochage*; après cela, on les lave et on les brosse énergiquement. Enfin, pour assurer l'adhérence du dépôt, on les passe encore dans deux bains acides très corrosifs dits bains de *blanchiment*. On les lave une fois de plus et on les porte à la dorure en évitant de les toucher — même avec des gants — de peur de les salir.

Pour quelques métaux même, tout ceci ne suffirait pas à rendre le dépôt d'or adhérent, et il faut commencer par les recouvrir galvaniquement d'une couche de cuivre ou d'argent.

Le bain est constitué par une solution d'environ 2 gr d'or par litre sous forme de chlorure, additionnée de cyanure de potassium. La conduite du bain nécessite toutes sortes de précautions et de tours de main, le dépôt pouvant être plus rapide et se terminer en une demi-heure si le bain est chauffé vers 70°.

Est-ce tout, au moins? Que non! Au sortir du bain, l'objet présente un aspect terne, qui ne laisse rien présager de l'apparence brillante à laquelle nous sommes accoutumés. Il faut le soumettre à un *gratte-bossage* énergique à l'aide d'une brosse en fils souples de aiton, puis on doit le faire passer à une opération chimico-physique qu'on appelle la *mise en couleur* et qui précède le *brunissage*, écrasement des particules métalliques à l'aide d'un outil d'acier ou d'agate, qui donne enfin à l'objet son aspect définitif.

Le tout sous réserves d'oublis.

On conçoit que le décigramme d'or déposé sur une cuiller à café ne pèse pas lourd devant ce déluge de manipulations.

C'est d'une façon analogue que l'on recouvre les métaux d'une couche d'*argent*. La préparation des objets est la même. Le bain est

une solution de 25 gr de cyanure d'argent par litre, additionné de cyanure de potassium. 4 éléments Bunsen suffisent à déposer en 4 heures — à condition d'aller vite — 500 grammes d'argent sur 5.000 cuillers.

Le *nickelage* est aussi une industrie analogue qui, par suite de l'inaltérabilité du nickel et de son bel aspect, a pris un développement important. Le nickelage s'effectue par l'électrolyse d'une solution de sulfate double de nickel et d'ammoniaque à 50 grammes par litre, avec, naturellement, l'anode soluble en nickel.

On dépose encore bien des métaux dans des buts différents.

Ne s'agit-il que de cuivrer des objets, on peut appliquer la remarque que nous avons faite en parlant de la pile Daniell, où nous

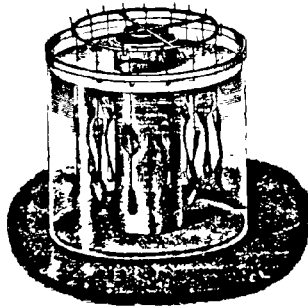


Fig. 74. — Appareil simple pour la galvanoplastie.

avons vu le cuivre se déposer sur l'électrode positive. Si l'on constitue cette électrode par les objets à cuivrer, cuillers, etc., on aura donc réalisé un appareil représentant à la fois une cuve galvanoplastique et une pile dont l'énergie pourra être employée à quoi l'on voudra. Si on en juge pas à propos d'utiliser ce *sous-produit*, comme il faut néanmoins que la *pile* débite pour que le cuivre se dépose, on mettra ses deux pôles en court-circuit. C'est la disposition indiquée dans la figure 74.

D'ailleurs, la puissance des procédés galvaniques ne connaît pas de limites, ne se laisse arrêter par aucun obstacle. On argente, on dore jusqu'à des fruits! On plonge chaque fruit dans une solution alcoolique de nitrate d'argent, puis on l'expose aux émanations sulfureuses: il se forme une couche noire et conductrice de sulfure d'argent. On porte alors le fruit dans la solution galvanique et on y amène le courant à l'aide d'une épingle: il ne tarde pas à se recouvrir d'une enveloppe métallique qui en reproduit tous les détails, même le duvet! On peut ainsi recouvrir d'une riche enveloppe des

insectes, des fleurs, des végétaux, et obtenir des bouquets métalliques d'une conservation indéfinie et de l'aspect le plus gracieux.

On a doré jusqu'à des robes de bal, et la robe de la richesse la plus invraisemblable contenait tout juste quelques centimes de métal!

Raffinage électrique des métaux. — Le transport de métal de l'anode à la cathode d'un bain galvanoplastique a été encore mis à profit d'une façon bien différente.

On a remarqué que si l'anode d'un bain est constituée par un métal incomplètement raffiné, tenant dans sa masse des impuretés, ces impuretés n'accompagnent pas le métal dans sa migration vers le pôle négatif et tombent sous forme de boue au fond du récipient.

A la cathode se dépose donc un métal absolument pur et l'on a évité ainsi les opérations chimiques compliquées et coûteuses qui eussent été nécessaires sans cela. Car il ne faut pas l'oublier, ce transport d'une électrode à l'autre, l'électricité le fait en se jouant, sans presque de dépense d'énergie. Aussi a-t-on mis à profit industriellement cette remarque, et le raffinage électrique du cuivre et du plomb s'effectue dans plusieurs grandes usines.

PRÉPARATION ÉLECTROLYTIQUE DES PRODUITS CHIMIQUES

Nous n'avons vu jusqu'à présent que les applications industrielles qui résultent du principe fécond de l'anode soluble. Mais d'autres industries se sont fondées qui mettent à profit l'électrolyse proprement dite, dans le but de séparer et de recueillir les produits qui proviennent de cette électrolyse.

Sans doute, il ne s'agit plus ici d'opérations effectuées pour ainsi dire gratuitement par l'électricité. Au contraire, elles nécessitent une dépense énorme d'énergie et il est bien certain que si l'ingénieur n'avait à sa disposition, comme outil producteur du courant, que la pile électrique, les industries en question eussent été bien en peine de se créer, alors que la galvanoplastie et ses dérivés n'en eussent guère été moins florissants.

Heureusement, nos ressources ne sont pas aussi limitées. Si la pile demande pour son alimentation de l'énergie chimique coûteuse, la dynamo, nous l'avons déjà dit, ne réclame que de l'énergie mécanique. Or, cette énergie mécanique, l'eau qui coule dans nos fleuves, les torrents qui grondent dans nos montagnes nous en offrent des trésors incessamment renouvelés que nous commençons à utiliser,

en attendant que nous nous adressions à cette source d'énergie bien autrement formidable encore, l'Océan.

Aussi, à l'heure actuelle déjà, des dizaines de milliers de chevaux sont empruntés aux chutes d'eau à l'aide de puissantes turbines, et transformés en énergie électrique dans de gigantesques dynamos.

Ici, cette énergie est employée à l'électrolyse du sel marin—chlorure de sodium—et livre la soude et le chlore qui en résultent à des prix auxquels les procédés purement chimiques ne peuvent prétendre.

Là, comme à Vallorbes, on utilise une réaction électrochimique un peu plus complexe, qui transforme en chlorate de potasse le chlorure de potassium.

Ailleurs, c'est l'alumine qu'on électrolyse, préalablement dissoute à haute température dans le fluorure double d'aluminium et de sodium (procédé de Hall), et on en retire déjà par milliers de tonnes annuellement l'aluminium, ce métal extraordinaire, destiné à prendre une si grande place dans la métallurgie.

D'autres usines électrochimiques ont pour but, par la réduction à haute température de la chaux par le charbon, la préparation du carbure de calcium, ce composé singulier qui, jeté dans l'eau, donne naissance à ce gaz d'un merveilleux pouvoir éclairant, l'acétylène. Mais ici, ce n'est plus du tout à titre d'agent de décomposition que l'électricité intervient. C'est au contraire pour provoquer l'union du calcium de la chaux avec le charbon en fournissant ce qu'elle seule sait fournir jusqu'à ce jour, la température énorme nécessaire pour provoquer cette combinaison.

Tels sont les principaux services que nous rend l'électrochimie encore à ses débuts. On peut par là préjuger de l'avenir et penser que les procédés électrochimiques prendront quelque jour une place absolument prépondérante dans l'industrie chimique.

ÉLECTRO-MAGNÉTISME

CHAPITRE DOUZIÈME

L'INDUCTION MAGNÉTIQUE

Voici, sur une table, une pile et un aimant.

Ce sont deux objets bien différents qu'il ne vous viendrait certainement pas à l'idée de supposer unis par les liens de famille les plus étroits.

Et cependant, il en est ainsi.

D'abord, souvenez-vous de l'action mystérieuse que le courant issu de notre pile exerce sur l'aiguille aimantée, qui n'est en somme qu'un petit aimant.

Ensuite, plongez dans de la limaille de fer un conducteur reliant les deux bornes de la pile : la limaille s'y attache ; ce fil l'attire comme le ferait un aimant !

Ou bien encore, enroulez ce fil en une hélice, une bobine d'un nombre de tours assez grand ; introduisez dans le vide laissé suivant l'axe une tige d'acier ; lancez le courant à travers les spires ; cette tige d'acier, quand vous la retirez, est devenue un aimant !

Nous verrons encore bien d'autres analogies entre les deux ordres de phénomènes. Au fond, comme l'a affirmé Ampère à la suite d'une série de magistrales expériences, magnétisme et électricité ne font qu'un, et c'est cette identité, exploitée comme aucune mine ne le fut, qui va nous fournir les applications les plus étonnantes de l'électricité.

Vers 1820, la découverte d'Ørsted avait excité dans les milieux scientifiques la plus vive émulation. Des recherches

importantes se poursuivaient de tous côtés avec activité. Elles aboutirent à cette constatation fondamentale d'Arago que, de même que le courant agit sur l'aiguille aimantée à l'égal d'un véritable aimant, il peut aussi, comme un aimant, attirer le fer. Et en effet, en plongeant un fil métallique parcouru par un courant dans de la limaille de fer, Arago l'avait retiré couvert de limaille.

Ampère, mis au courant par Arago de cette expérience, pensa immédiatement que puisqu'en enroulant le fil sur lui-même on augmentait son action sur l'aiguille aimantée (Schweigger venait de découvrir les propriétés du *multiplificateur*), il était fort probable qu'on devait de la même façon augmenter aussi les effets d'aimantation. Une tige de fer fut donc enroulée de spires nombreuses de fil isolé dans lesquelles un courant fut lancé. La tige de fer, pendant tout le temps du passage du courant, se montra capable de soulever des mor-

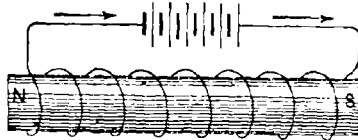


Fig. 75. — Aimantation du fer par le courant.

ceaux de fer d'un poids considérable, qui se détachaient dès que le courant était interrompu.

L'électro-aimant était découvert !

Ampère fit encore une observation intéressante : tandis que la tige de fer perdait son aimantation dès la cessation du courant, l'aimantation d'une tige d'acier, au contraire, persistait indéfiniment. On avait donc là le moyen de fabriquer artificiellement des aimants permanents.

Ainsi, dès les premiers travaux d'Arago et d'Ampère, le lien entre l'électricité et le magnétisme, aperçu par Ørsted, se dessine et s'affirme. Non seulement l'électricité est susceptible d'influencer à distance l'aiguille aimantée, mais elle se montre capable *d'engendrer par elle-même des effets magnétiques*. Que faut-il de plus pour mettre hors de doute cette communauté d'origine ? prendre le contre pied de cette proposition et montrer qu'à leur tour les aimants sont capables *d'engendrer des effets électriques*.

COURANTS INDUITS PAR LES AIMANTS CHAMP MAGNÉTIQUE

C'est l'illustre Faraday qui, en 1832, se chargea de la démonstration.

— Il est bien entendu, se dit Faraday, que si nous plaçons un barreau de fer ou d'acier à l'intérieur d'une bobine, ce barreau s'aimante dès qu'un courant traverse la bobine. Mais est-ce que par hasard le contraire ne serait pas possible ? Est-ce que, en plaçant à l'intérieur d'une bobine un aimant, on ne donnerait pas naissance à un courant ?

Qu'eussiez-vous fait à la place de Faraday ? Vous eussiez tenté l'expérience, expérience bien simple, puisqu'il suffisait de relier la bobine à un galvanomètre et d'approcher l'aimant

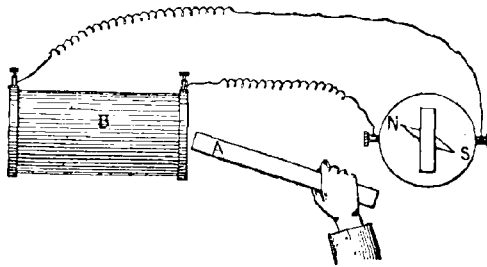


Fig. 76. — Faraday découvre l'induction.

(fig. 76). C'est ce que fit Faraday, et à sa grande satisfaction, il vit l'aiguille *dévier fortement*.

La satisfaction de Faraday était justifiée : il venait d'empêcher son plus beau titre de gloire en découvrant *l'INDUCTION*.

Mais il l'avait échappé belle !

Quelques mois auparavant, un jeune physicien de Genève manipulait avec ardeur galvanomètres et bobines de fil, comme beaucoup d'autres savants de ce temps-là. Lui aussi s'était dit que puisque les courants électriques engendraient le magnétisme, le magnétisme à son tour pouvait peut-être engendrer l'électricité. Et lui aussi cherchait la preuve.

Un jour, donc, il prépara exactement l'expérience que devait effectuer Faraday quelques mois plus tard, plaça un galvanomètre dans le circuit de sa bobine et y introduisit

l'aimant. Rien !... Il tourna, retourna l'aimant de trente-six façons différentes : Toujours rien !...

Après quelques heures de cet exercice, dépité, il planta là son expérience, persuadé que son flair, en fait d'induction, l'avait tout simplement induit en erreur.

Ce jeune expérimentateur n'était autre que le futur célèbre physicien genevois Colladon, mort ces dernières années. et on juge de sa déconvenue, quelque temps après, à l'annonce de la découverte de Faraday et de l'enthousiasme qui l'accueillit !

Comment donc un observateur aussi attentif, aussi avisé que Colladon avait-il pu aboutir à un résultat semblablement piteux ? Qu'était-il arrivé ? Il était arrivé tout simplement ceci, que l'aiguille du galvanomètre avait bien remué, mais que Colladon n'y avait rien vu ! Et il y avait à cela une raison.

A cette époque lointaine, Colladon était encore presque un inconnu : son laboratoire était petit et il lui fallait faire ses travaux seul, sans le plus modeste assistant. Faute de place et aussi pour soustraire l'aiguille du galvanomètre à l'action directe de l'aimant, il avait dû installer le galvanomètre dans la pièce voisine de celle où se trouvait la bobine.

Or, l'expérimentateur était persuadé que de même que l'aimantation produite par le courant dure autant que le courant, de même le courant produit par l'aimant — à supposer qu'il y en ait un — devait persister autant que la présence de l'aimant dans la bobine. Lorsqu'il avait introduit l'aimant dans la bobine, Colladon s'en allait donc tranquillement dans la pièce voisine observer le galvanomètre, dont l'aiguille, à ce moment, était déjà revenue au repos.

Comme les carabiniers célèbres, il arrivait toujours trop tard !

Si Colladon avait pu se douter que les courants *induits* par les aimants sont *instantanés*, qu'ils ne peuvent se produire qu'aux dépens de l'énergie empruntée à la main qui fait déplacer l'aimant et par conséquent doivent cesser avec le mouvement qui les engendre, il se fut un peu plus dépêché pour aller voir son galvanomètre, il fut arrivé avant que l'aiguille ait cessé d'osciller. Le plus beau titre de gloire de Faraday aurait appartenu à un autre et le *microfarad* se

serait appelé le *microcolle*, pour la plus grande jalousie des bactériologistes et de leurs microcoques.

Et il faut bien, de toute nécessité, que les courants induits possèdent le caractère d'instantanéité qui avait échappé à Colladon. Si en effet on enfonce dans la bobine induite et qu'on retire alternativement l'aimant un très grand nombre de fois, on pourra produire des quantités considérables d'énergie électrique, qui se dépenseront en chaleur dans le circuit : or, après cette expérience, aussi prolongée qu'on le veut, on n'observe *aucune* modification, magnétique ou autre, dans l'état du barreau aimanté ; ce ne peut donc être à de l'énergie empruntée à ce barreau qu'est due l'énergie électrique constatée : il est alors évident que celle-ci ne peut être empruntée qu'à la seule source d'énergie qui entre en jeu, c'est-à-dire à l'expérimentateur.

Si nous disposions d'instruments assez sensibles, nous verrions en effet que pour introduire le barreau dans la bobine ou l'en retirer, il nous faut déployer *un certain effort*, d'autant plus grand d'ailleurs que la bobine est fermée sur une résistance plus faible, parce que les *courants induits* qui prennent naissance dans le circuit sont alors plus intenses, ce qui augmente la puissance absorbée.

Ainsi, le déplacement des aimants par rapport aux circuits métalliques fermés nous donne un moyen extrêmement commode de transformer de l'énergie *mécanique* en énergie *électrique*. C'est sur ce principe que sont fondées toutes les machines électriques industrielles.

Mais avant d'aborder l'étude de celles-ci, nous essaierons de nous rendre compte de quelle manière se produisent ces courants d'induction.

Quant aux effets magnétiques des courants, nous n'y insisterons pas plus pour l'instant, en ayant assez dit pour qu'il soit possible de consacrer le chapitre pratique suivant à l'étude de quelques-unes des applications de l'électro-aimant.

Champ magnétique; lignes de force. — Puisque les aimants, tant naturels qu'artificiels, jouent un si grand rôle en électricité, il est assez naturel que nous leur consacrons quelques instants d'attention.

Vous savez par expérience — car tout le monde a eu des aimants entre les mains — que toute la région qui avoisine un aimant est dans un état bien particulier. Un morceau de fer placé dans cette région est attiré vers l'aimant quand bien même un obstacle l'en sépare, lame de verre ou feuille de carton. On dit que l'objet est dans le *champ magnétique* de l'aimant. C'est là encore un nom de baptême calqué sur le langage populaire, car on dit communément que telle chose ou telle affaire est *dans le champ d'action* de telle personne. Seulement, ici, on a fini par faire d'une simple locution une chose quasi-matérielle, et au lieu d'entendre qu'un aimant a une certaine sphère, un certain *champ d'action magnétique* on va plus loin et on dit que l'espace qui l'entoure est occupé par un *champ magnétique*.

L'étude de ce champ magnétique est essentielle, car c'est à l'existence de cette région alentour de l'aimant que sont dus les phénomènes électriques d'induction que nous avons eu et aurons à constater.

Si cette région est douée de propriétés si particulières, on admet que c'est parce qu'elle est sillonnée de filets immatériels appelés *lignes de force*, jouissant de propriétés magnétiques et se dirigeant à travers l'air du pôle nord au pôle sud de l'aimant.

Fantômes magnétiques. — Disons, d'ailleurs, qu'on a fait mieux que d'imaginer ces filets immatériels et de leur donner un nom. On les a mis en quelque sorte en évidence.

L'expérience est assez intéressante et assez simple à la fois pour que nous la répitions.

Elle consiste (fig. 77) à placer l'aimant sous une feuille de carton et à saupoudrer celle-ci de limaille de fer en donnant quelques secousses. La limaille est ainsi soumise à l'attraction de l'aimant, mais au lieu de la voir se grouper d'une façon quelconque au voisinage des pôles ainsi que vous vous y attendiez, vous constatez qu'elle se rassemble en filets formant des courbes bien régulières allant d'un pôle à l'autre.

Ces lignes ne sont autre chose que la trajectoire des *lignes de force* rendue visible.

Telle est l'expérience des *fantômes magnétiques*, qu'il est

facile de fixer sur la feuille de carton, préalablement gommée, en y pulvérisant un peu d'eau.

La figure 78 représente le fantôme magnétique non plus d'un barreau aimanté droit, mais d'un aimant en fer à cheval.

Toutes les lignes de force, sans exception, vont d'un pôle à l'autre après avoir parcouru dans l'espace un trajet plus ou moins long. Il serait facile de le voir en prenant, pour faire l'expérience précédente, une feuille de carton plus grande.

On a été amené à considérer ces lignes de force comme le résultat d'une circulation analogue à celle du circuit électrique : on admet que les lignes de force partent du pôle nord de l'aimant, franchissent l'air par une trajectoire plus ou moins

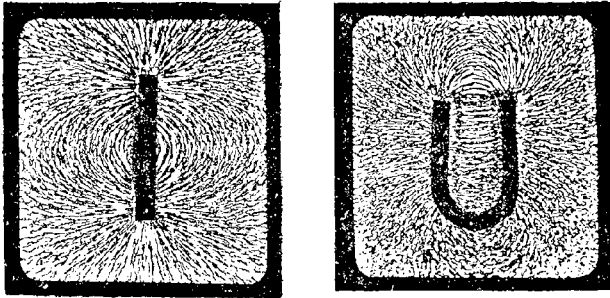


Fig. 77 et 78. — Fantômes magnétiques d'un aimant droit et d'un aimant en fer à cheval.

allongée, gagnent le pôle sud et, de là, se dirigent vers le pôle nord à travers l'aimant. On a appliqué à ce *circuit magnétique* ainsi constitué des considérations analogues à celles du circuit électrique; d'où la notion de *force magnétomotrice*, cause du *flux magnétique* comme la force électromotrice est la cause du courant ou flux électrique, et la notion de *résistance magnétique* opposée au passage du flux, résistance qui est infiniment plus grande dans l'air que dans le fer, dont la *perméabilité* magnétique, on ne sait pourquoi, est excellente (1).

(1) De même que l'air, le bois, le papier, et en général toutes les substances, sont perméables au flux magnétique: les lignes de force traversent avec facilité toutes ces substances. Si ces radiations magnétiques jouissaient de la propriété d'influencer des plaques photographiques, la découverte de Roentgen nous eût moins surpris, car c'est, au fond, l'application d'un phénomène du même ordre.

Nous n'insisterons pas sur ces considérations, mais elles nous suffisent pour concevoir que les lignes de force, à leur sortie du pôle nord, choisissent de préférence le chemin le plus court pour rentrer au pôle sud. Le fantôme magnétique d'un barreau en fer à cheval, en effet, démontre bien que les lignes de force y sont surtout pressées entre les deux branches, au voisinage des pôles.

Tirons de tout cela des conséquences pratiques.

Prenons un système aimanté fournissant entre les pôles N, S, un champ magnétique (fig. 79.) Plaçons dans ce champ, perpendiculairement à sa direction, un conducteur A B relié à un galvanomètre. Déplaçons ce conducteur de manière à

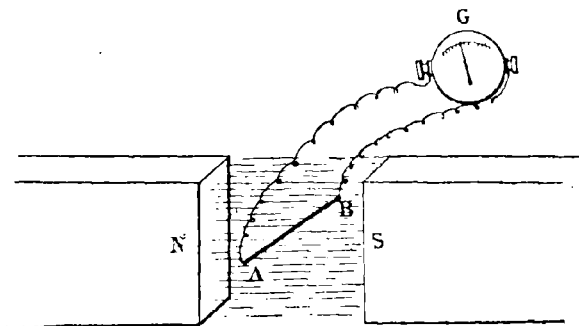


Fig. 79. - Induction d'un courant dans un conducteur qui se déplace dans un champ. *couper* les lignes de force que nous a révélées le fantôme magnétique. Le galvanomètre nous indique un courant qui persiste tant que le conducteur *coupe* des lignes de force, c'est-à-dire tant qu'il se déplace au voisinage de l'aimant.

Et en effet, les lignes de force opposent une certaine résistance mécanique au passage d'un conducteur faisant partie d'un circuit *fermé*. Elles se comportent comme si elles étaient de vrais filets matériels, et on est obligé, pour les *couper* en faisant avancer le conducteur à travers ce milieu résistant, de le pousser, en dépensant une énergie qui, ainsi que le galvanomètre est là pour l'indiquer, est immédiatement transformée en électricité dans le circuit électrique. Mais si le circuit auquel le conducteur appartient est ouvert, il ne peut plus s'y dépenser de courant, et on constate justement par l'expérience que le conducteur n'éprouve plus alors aucune résistance à traverser le champ magnétique. *Toute* la résistance qu'il éprouvait

lorsque le circuit était fermé provenait donc de l'absorption d'énergie électrique dans le circuit. Voilà ce que nous apprend l'expérience.

Si l'obstacle opposé au déplacement du conducteur dépend bien en réalité de la nécessité de rompre des lignes de force, elle doit nous apprendre aussi, cette expérience, que l'obstacle est d'autant plus grand que les lignes de force sont plus nombreuses. C'est, nous l'avons dit, entre les branches d'un électro-aimant que cette abondance est la plus grande : Eh bien, si nous faisons partir notre conducteur d'entre les branches du fer à cheval et que nous l'amenions à une vitesse régulière jusqu'à la région où le fantôme magnétique nous a montré que les lignes de force étaient très rares, le galvanomètre nous indique un courant qui, maximum lorsque le conducteur passait entre les deux pôles, là où les lignes sont le plus nombreuses, va en diminuant régulièrement à mesure que nous nous éloignons, que nous avons à rompre moins de lignes de force.

La démonstration est donc parfaite.

Vous concevez également que plus le conducteur se déplacera *rapidement* à travers le champ, plus il coupera à chaque instant de lignes de force. Notre galvanomètre nous indique en effet que plus notre conducteur se déplace rapidement, plus le courant produit est énergique. En un mot, la force électromotrice induite par l'aimant sur le conducteur est d'autant plus grande que le nombre de lignes de force coupées dans l'unité de temps est plus grande.

Remarquez qu'il faut encore pour que le nombre des lignes coupées soit grand, que le conducteur se déplace le plus possible *perpendiculairement* à leur direction, car s'il se déplaçait dans leur direction, il ne les couperait pas.

Vous ne serez pas étonné, après ces considérations, d'apprendre que dans les dynamos, où on se propose d'obtenir des effets électriques très grands, on fait déplacer très vite des conducteurs dans des champs *très intenses*.

Autre chose encore, aussi facile à comprendre. Le conducteur que nous faisons déplacer dans le champ magnétique à

travers les lignes de force en coupe évidemment d'autant plus qu'il est *plus long*. S'il a seulement un centimètre de long par exemple, il ne coupera que peu de lignes de force, même s'il se déplace très vite dans un champ très intense. Nous serons donc conduits à prendre un conducteur très long pour augmenter les effets produits, pour augmenter la puissance mécanique que nous pouvons transformer en énergie électrique. Mais le champ produit par notre aimant, par notre système *inducteur*, comme on dit, a forcément des dimensions très restreintes, ou plutôt n'est intense que dans une faible région; en allongeant le conducteur, ses extrémités arrivent donc dans une région où les lignes de force sont très clairsemées et ne servent alors presque plus à rien.

Nous devons, par suite, ramasser tout notre conducteur dans la région où le champ est très intense, et ceci nous permet de pressentir que les enroulements sous forme de *bobines* vont encore jouer ici un rôle considérable.

Dernière remarque, enfin, d'une importance capitale. Si nous coupons d'abord les lignes de force dans un certain sens, par exemple en approchant le conducteur vers l'aimant et l'amenant entre les branches du fer à cheval, nous produisons un courant d'un certain sens. Mais dès que nous revenons en arrière, brusquement la déviation du galvanomètre change de sens, nous indiquant que le courant est maintenant *inverse* de ce qu'il était auparavant. (1) Et si nous continuons

(1) Il existe pour déterminer ce sens du courant une règle empirique d'une application que les manchots seront seuls à trouver malaisée : C'est

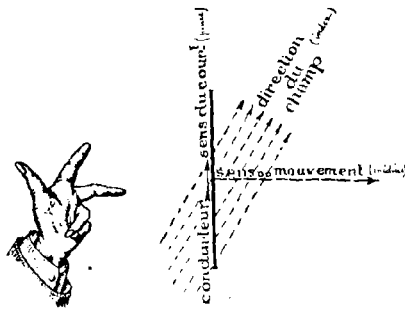


Fig. 80. — Règle des trois doigts.

à règle dites *des trois doigts*. Figurez par l'index de la main gauche la

faire déplacer alternativement dans un sens puis dans l'autre notre conducteur, le circuit sera parcouru alternativement par des courants de sens inverse, ou, comme on dit, par un *courant alternatif*.

Ce courant présente des propriétés bien différentes de celui de la pile, mais son étude est bien plus difficile. Nous consacrerons plus loin quelques pages à l'étude de ses curieuses propriétés. Pour le moment, nous ne nous occuperons que de voir quels artifices on a employés pour faire produire aux phénomènes d'induction des courants continus analogues à ceux de la pile.

Disons encore, avant de terminer, qu'on a coutume d'exprimer les résultats auxquels nous venons d'arriver sous une forme plus commode.

Le conducteur que nous déplaçons dans le champ constitue, avec le réseau sur lequel il débite, un circuit fermé embrassant un certain nombre des lignes de force du champ, un certain *flux*, suivant l'expression consacrée. Si on le déplace dans un sens tel que la surface circonscrite par le circuit augmente, le nombre des lignes de force, ou *flux* embrassé *augmente* naturellement aussi, et nous savons que ce déplacement se traduit par la production d'un courant d'un certain sens. Si on déplace le conducteur en sens contraire, la surface que le circuit présente au champ magnétique diminue le nombre des lignes de force embrassées *diminue* également,

direction des lignes de force du champ, par le pouce le conducteur qui se déplace dans ce champ, par le troisième doigt — le médium si je ne m'abuse — la direction dans laquelle on tire le conducteur. Le courant produit ira dans celui-ci, dans le sens indiqué par le pouce, qui figure ainsi non seulement le conducteur, mais aussi le sens du courant qui circule dans ce conducteur. Toutes les particularités indiquées ci-dessus pour ce sens du courant se retrouvent bien ici.

Par exemple, si, conservant la même direction du champ, c'est-à-dire de l'index, on veut voir ce qui advient si on tire le conducteur en sens inverse, il faut faire tourner la main, par une rotation du poignet, de manière que le médium, qui était dirigé vers la droite, vienne maintenant vers la gauche; et on voit alors que le pouce se présente maintenant la tête en bas, ce qui veut dire que le courant a changé de sens.

On voit aussi que si on suppose changé le sens des lignes de force du champ, ce qui revient à tourner l'index en sens contraire, et si on tire toujours le conducteur du même côté, le pouce se présentera encore la tête en bas, ce qui veut dire que quand on inverse le champ, on inverse aussi le courant produit par un déplacement donné.

ce qui se traduit par la production dans le circuit d'un courant de sens *inverse*.

On fait alors porter l'interprétation de ces phénomènes, non plus sur le nombre des lignes de force *coupées*, mais sur la *variation* du nombre de lignes de force *embrassées* — ce qui revient exactement au même — et ceci permet d'exprimer sous une forme commode que : la f. é. m. induite dans un circuit qui se déplace dans un champ est à chaque instant proportionnelle à la *variation du flux embrassé*. En outre, le sens de cette f. é. m., c'est-à-dire le sens du courant qu'elle peut produire, dépend aussi du sens de la variation.

Cette petite modification n'a l'air de rien. Elle permet pourtant de comprendre sans commentaires certains faits qu'il serait long d'expliquer autrement.

Ainsi, un anneau conducteur qui se déplace dans un champ uniforme *parallèlement à lui-même* n'est le siège d'aucun courant bien qu'il coupe énormément de lignes de force : seulement, aux lignes coupées en avant correspondent des lignes coupées en arrière et ces deux effets se neutralisent parce qu'ils produisent deux f. é. m. égales et opposées dans les deux parties du conducteur. Or, au lieu de tous ces beaux raisonnements, on peut se rendre compte immédiatement qu'il doit en être ainsi, car la surface que l'anneau présente au champ reste toujours la même dans sa translation, ainsi par conséquent que le nombre total des lignes de force embrassées puisque le champ est supposé uniforme. Donc, pas de *variation de flux*, partant, pas de f. é. m. effective.

On voit immédiatement aussi qu'une spire qui tourne rapidement autour d'un de ses diamètres dans un champ est le siège de courants très énergiques, car le flux qu'elle embrasse varie à chaque instant.

D'ailleurs, cette formule présente encore cet autre avantage qu'elle est plus générale, car une variation du flux embrassé peut n'être pas causée par le déplacement du circuit dans le champ, mais encore par une variation dans l'intensité du champ embrassé.

Par exemple, si nous approchons un morceau de fer d'un aimant placé dans une bobine, nous modifions la résistance

magnétique et changeons le parcours des lignes de force. Donc nous faisons *varier* le flux à l'intérieur de la bobine et nous produisons un courant.

RÉSUMÉ

Les phénomènes électriques et les phénomènes magnétiques présentent les liens de parenté les plus étroits : Le courant électrique est capable de produire des effets magnétiques, action sur l'aiguille aimantée, attraction de la limaille de fer par un conducteur traversé par un courant, aimantation temporaire d'une tige de fer placée à l'intérieur d'une bobine raversée par un courant (*électro-aimant*). De son côté, l'aimant est capable de produire des effets électriques : *induction* d'un courant dans une bobine par l'introduction d'un aimant à l'intérieur de cette bobine. Ce courant d'induction est produit aux dépens de l'énergie de la cause qui fait mouvoir l'aimant. On a donc là un procédé commode de transformer de l'énergie *mécanique* en énergie *électrique*. C'est ce procédé qui est mis à profit dans les machines *dynamo* et *magnéto électriques*.

Tout aimant est caractérisé par un *champ magnétique* constitué par des *lignes de force* allant d'un pôle à l'autre et que me en évidence l'expérience des fantômes magnétiques. Ces lignes de force sont surtout condensées, dans le cas d'un aimant en fer à cheval, entre les branches du fer à cheval. Si on fait déplacer à travers ces lignes de force un conducteur électrique qui les coupe, on *induit* dans ce conducteur une force électromotrice proportionnelle au nombre de lignes de force coupées à chaque instant. Aussi, dans les dynamos, fait-on déplacer *très vite* dans des champs *très intenses* une grande longueur de conducteur rassemblée sous forme d'enroulement.

On exprime encore le résultat précédent en disant que la f. é. m. induite dans un circuit qui se déplace dans un champ magnétique est à chaque instant proportionnelle à la *variation* du flux embrassé, et que son sens, donné par la règle empirique des trois doigts, dépend aussi du sens de cette variation.

CHAPITRE TREIZIÈME

APPLICATIONS DES ÉLECTRO-AIMANTS

SONNERIES ÉLECTRIQUES

La précieuse propriété découverte par Ampère de l'aimantation du fer dans une bobine parcourue par un courant, aimantation essentiellement *temporaire* et cessant instantanément (1) avec le courant qui la produit a été la base d'une foule d'applications.

Nous n'en décrivons ici que quelques-unes, à commencer sinon par la plus utile, du moins par celle qui a peut-être plus contribué qu'aucune autre à vulgariser l'électricité : la sonnerie électrique.

Disons d'abord que presque jamais l'électro-aimant n'est employé sous la forme qu'il avait au moment de sa découverte par Ampère, et qui est représentée par la figure 81. Sous cette forme, en effet, on ne peut obtenir que l'attraction assez faible de l'*armature M*.

Vous concevez que pour agir avec plus d'énergie, on ait songé à utiliser les deux pôles au lieu d'un seul, ce qui a conduit à la forme en *fer à cheval* de la figure 82. Dans ces conditions, les effets ne sont pas seulement *doublés* comme vous pourriez le croire, mais bien plus que doublés parce que les *lignes de force* du champ magnétique produit quand l'électro est *excité* n'ont à traverser que très peu d'air. La *résistance magnétique* (voir page 148) est alors bien diminuée et les effets d'attraction sont beaucoup augmentés. Ajoutons en passant que c'est pour diminuer encore cette résistance magnétique, pour se *raccourcir* le plus possible, que les lignes de force du champ, agissant comme le feraient des fils de caoutchouc, rapprochent violemment l'*armature*.

On utilise généralement à la fois les deux branches de l'électro-aimant en fer à cheval pour y enrouler le fil nécessaire à son aimant-

(1) Pas rigoureusement, car rien n'est instantané dans la nature.

tation. Il faut naturellement faire en sorte que les effets des deux bobines s'ajoutent, c'est-à-dire que les flux produits par chacune d'elles circulent dans le même sens à travers le fer. Pour faire l'enroulement en conséquence, on n'a qu'à se baser sur une règle empirique très commode, connue sous le nom de règle du tire-bouchon de Maxwell.

Règle du tire-bouchon de Maxwell. — Lorsqu'un courant circule

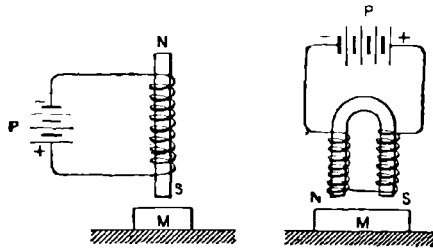


Fig. 81 et 82. — L'électro en fer à cheval attire l'armature M beaucoup plus énergiquement que l'électro droit.

dans une bobine, il produit un champ magnétique dont les lignes de force sont dirigées dans le sens de l'avancement d'un tire-bouchon qu'on tourne dans le sens de la circulation du courant : tout le monde sait que si le tire-bouchon tourne dans le sens des aiguilles d'une montre, il avance, et qu'il recule dans le cas contraire.

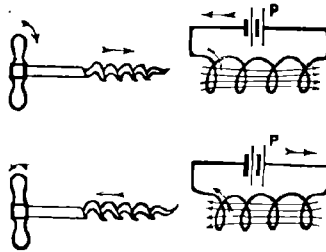


Fig. 83. — Règle du tire-bouchon de Maxwell.

Réciproquement, si on connaît le sens du flux magnétique produit par un courant, il est facile de déduire le sens de ce courant en voyant dans quel sens il faut faire tourner un tire-bouchon pour que son axe se déplace dans le sens des lignes de force. Nous verrons de ce fait une application très utile lorsque nous établirons la théorie de l'anneau Gramme.

Pour le moment nous concluons simplement de l'application de cette règle que les enroulements dans les deux branches d'un électro en fer à cheval doivent être *en sens contraires* comme il est indiqué dans la figure 82.

Considérons un circuit comprenant un électro E en fer à cheval et une pile P, avec, en outre, un interrupteur disposé comme l'indique schématiquement la fig. 84 de manière à fermer le circuit quand on presse sur un bouton I dit *bouton d'appel*. L'électro est placé en regard de son armature mobile M, laquelle est fixée d'un côté à un ressort R et terminée de l'autre par une petite sphère métallique placée en regard d'un timbre T. Quand nous pressons sur l'interrupteur l'électro attire son armature et la petite sphère vient frapper le timbre.

Voilà donc notre sonnerie constituée. Il faut seulement faire attention qu'au moment de l'attraction, la sphère vienne choquer le timbre par suite d'une légère élasticité de la tige qui le supporte,

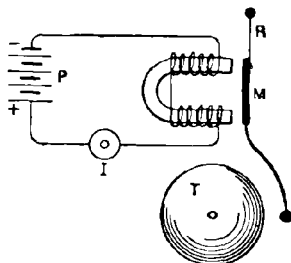


Fig 84. — Sonnerie sonnante un seul coup.

car si après le choc le marteau restait collé au timbre, il en étoufferait les vibrations sonores.

Pourtant, ce n'est pas le résultat auquel nous venons de parvenir que nous avons l'habitude de demander à une sonnerie électrique, car tout se borne ici à un coup *unique*, l'armature M restant attirée tant que nous pressons sur le bouton.

Mais si nous voulons obtenir cette succession rapide de coups qui est le propre de la sonnerie électrique, il nous suffira d'une modification bien simple.

Au lieu de relier directement les deux pôles de la pile aux deux bornes de l'électro, nous amènerons l'un des deux fils de la pile à l'armature mobile elle-même, en faisant le contact sur l'appendice L, comme l'indique la figure 85. Dans ces conditions, tant que la sonnerie est au repos, le ressort L et la pointe en argent O sont en contact ; aussi, dès que l'interrupteur I est fermé, le courant peut circuler dans l'électro qui attire son armature mobile : d'où premier

coup de timbre. Mais, en même temps, le contact entre L et O s'est rompu. Le courant cesse donc et l'armature, désaimantée, revient rétablir le contact. D'où, nouveau courant, second coup de timbre, et ainsi de suite. On obtient ainsi, en définitive, une succession très rapide de coups de timbre qui persiste autant que la pression sur le bouton d'appel.

Une différence de potentiel de 4 à 5 volts suffit, en général, pour faire fonctionner les sonneries, auxquelles le courant d'alimentation est le plus souvent fourni, pour des raisons que nous avons indiquées précédemment (voir page 39) par 3 ou 4 éléments de pile Leclanché.

Habituellement, les services que l'on sait faire rendre aux sonneries électriques sont assez restreints. On est satisfait quand, d'un endroit d'une maison ou d'un appartement, on peut appeler une personne placée à un autre endroit. Il serait cependant facile d'ob-

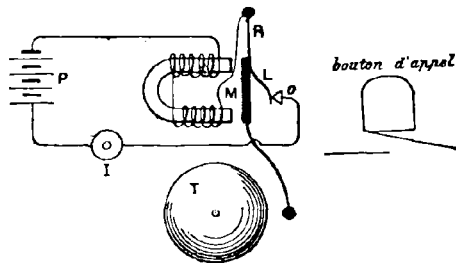


Fig. 85 — Sonnerie donnant un roulement prolongé aussi longtemps que la pression sur le bouton d'appel.

tenir plus et mieux en n'utilisant cependant que la même sonnerie

Quelques détails à ce sujet ne seront sans doute pas jugés superflus.

D'abord, on peut actionner une sonnerie d'autant d'endroits différents que l'on veut, en plaçant en ces endroits autant de boutons d'appel. D'habitude cette installation est faite de la manière suivante :

De la batterie de piles Leclanché une canalisation générale établie comme nous l'avons dit (voir page 112) en parlant d'éclairage domestique (1), conduit la diff. de pot. à travers tout l'appartement. L'une des bornes de la sonnerie est reliée avec l'un des pôles de la canalisation ; l'autre pôle communique, par un fil commun, avec des interrupteurs successifs I, I', placés dans les différentes pièces

(1) En fil plus fin, cependant, l'intensité étant ici très faible. Du fil de 1 millimètre, recouvert de soie ou de coton, suffira amplement.

mais tous reliés à l'autre borne de la canalisation. Que vous appuyiez sur l'un quelconque des interrupteurs, vous déterminerez toujours à travers la sonnerie le passage d'un courant qui la met en branle.

Mais il y a un inconvénient à agir de cette façon. Tous les signaux sont identiques quel que soit le bouton d'appel employé. Il faut arriver à *différencier* ces signaux, de telle sorte que la sonnerie ne fonctionne pas de la même façon si c'est par exemple du salon ou du bureau que l'on sonne, et que la personne appelée puisse le savoir immédiatement. Or, ce n'est pas bien difficile à réaliser en se conformant au schéma (fig. 86) et aux indications suivantes :

Une sonnerie électrique comporte généralement *deux* bornes, disposées sur le socle de l'appareil et communiquant, comme on le voit sur la fig. 86, l'une, *b*, avec une des extrémités du fil de la bobine, l'autre *b'* avec le contact *i* de la tige oscillante. A ces deux bornes, nous commencerons par en ajouter *une troisième, b''*, communiquant

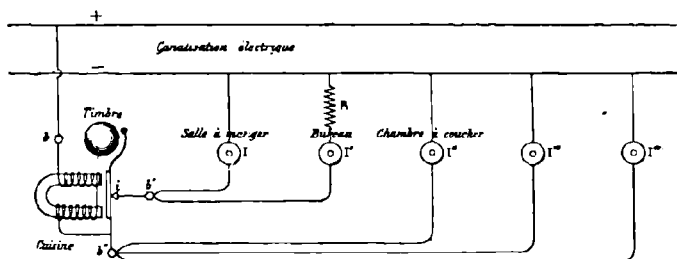


Fig. 86. — Sonnerie électrique unique donnant cinq signaux différents.

directement avec la seconde extrémité du fil de l'électro sans passer par le contact *i*.

Ceci posé, nous avons disposé dans les différentes pièces de l'appartement des interrupteurs I, I', I'', I''', I'', communiquant tous avec le même pôle de la canalisation. Le bouton I, placé, je suppose, dans la salle à manger, communique d'autre part avec la borne normale *b'* de la sonnerie. Sa manœuvre provoque, par conséquent, un *roulement* ordinaire, prolongé et *énergique*.

Le second interrupteur I', placé, par exemple, dans le bureau, est relié à la même borne *b'*, mais, quelque part sur le trajet, une résistance suffisante, R, constituée par un boudin de fil fin enroulé en spirale est intercalée. Nous obtenons, dans ce cas encore, un *roulement continu*, mais *bien plus faible*, car la résistance intercalée diminue l'intensité du courant et l'énergie des actions.

Le 3^e interrupteur I'', lui, est relié avec la borne supplémentaire *b''* et sa manœuvre produit, comme on peut s'en rendre

compte, une attraction ininterrompue, de sorte que la sonnerie, ici, ne sonne qu'un *seul coup*.

Le 4^e et le 5^e interrupteurs, enfin, également reliés à la borne supplémentaire, présentent une constitution spéciale que montrent les figures 87 et 88. Il est facile de se rendre compte qu'en appuyant sur le 4^e interrupteur (fig. 87) on émet deux courants successifs, le premier en appuyant sur le bouton, le second en l'abandonnant, et qu'en appuyant sur le 5^e interrupteur (fig. 88) on émet d'abord deux courants successifs très rapprochés, et un 3^e lorsqu'on abandonne le bouton. La sonnerie sonnera donc *deux coups* pour I''' et *trois coups* pour IV.

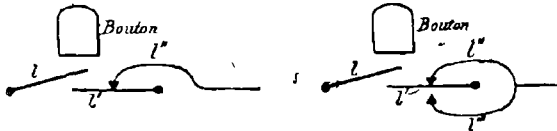


Fig. 87 et 88. — Schéma des interrupteurs I''' et I'''.

En se creusant la tête, on arriverait à augmenter encore cette variété dans les signaux.

Que nos lecteurs se la creusent s'ils le jugent à propos...

PRINCIPE DU TÉLÉGRAPHE ÉLECTRIQUE

L'idée du *télégraphe* électrique remonte à la découverte d'Ersted. Quelqu'un le proposa à cette époque, qui fut traité de fou. Et allez donc !... Combien d'inventeurs connaissent le compliment !

C'était pourtant, celui-là, un fou très raisonnable : l'action sur l'aiguille aimantée, combinée avec la vitesse énorme de propagation de l'électricité vitesse déjà constatée, donnait dès ce moment tous les éléments nécessaires pour résoudre la question.

Imaginez que par vingt-cinq circuits conducteurs on ait reliés entre eux les deux points à réunir télégraphiquement, chacun de ces circuits correspondant avec une aiguille aimantée.

Imaginez encore que chacun de ces vingt-cinq systèmes ait été assimilé conventionnellement à l'une des lettres de l'alphabet. Suivant que l'expéditeur aurait fait passer le courant dans tel ou tel fil, l'aiguille correspondante aurait été déviée et on aurait pu ainsi transmettre tel mot, telle série de mots que l'on aurait voulu. Sans doute ce n'eût été ni très économique comme système, ni très expéditif comme transmission ! mais enfin, quand y on songe, la transmission à distance de la pensée est chose si merveilleuse que si rudi-

mentaire que fut son système, l'inventeur aurait dû rencontrer mieux qu'une simple menace de visite à Charenton.

Il ne fait jamais bon être trop en avance sur son temps.

Le télégraphe électrique est donc plus moderne. A part quelques recherches d'Henry, restées sans sanction pratique, ce n'est même qu'en 1840 que l'américain Morse songea à utiliser au profit de la transmission de la pensée les ressources infinies de l'instrument dont Ampère avait enrichi la science quinze ans auparavant. Il est

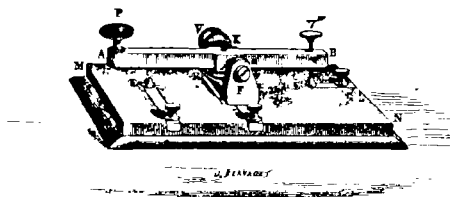


Fig. 89. — Clef de Morse.

vrai que par compensation, Morse dotait la société, du jour au lendemain, d'un instrument parfait, qui s'est conservé jusqu'à nos jours dans la plupart des postes télégraphiques du globe.

Tout le monde connaît le télégraphe Morse pour l'avoir vu aussi bien qu'*entendu* fonctionner, et il suffira d'en indiquer le principe en quelques mots.

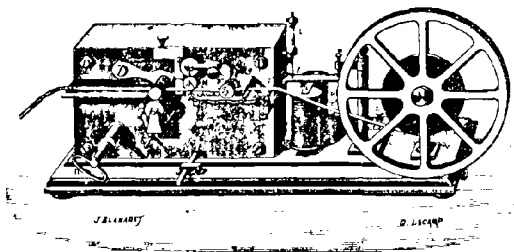


Fig. 90. — Récepteur Morse.

Le *transmetteur* se compose tout simplement d'un interrupteur ou *clef de Morse* (fig. 89) que l'opérateur manipule en un *tic-tac* tout à fait caractéristique, de manière à envoyer dans le circuit des émissions de courant soit brèves, soit un peu plus prolongées. Ces émissions cheminent le long de la ligne, parviennent au récepteur à peu près instantanément quelle que soit sa distance — même *avant* l'heure

de départ si la station réceptrice est vers l'Ouest—et y actionnent un électro-aimant *imprimeur* dont l'armature trace à chaque attraction un trait sur une étroite bande de papier qu'un mouvement d'horlogerie déroule uniformément. Suivant que l'émission est longue ou brève, le stylet marque sur la bande un *trait* ou un *point*; c'est la succession de ces traits ou de ces points qui, à l'aide de quelques conventions très simples, permet de reconstituer les mots que le poste expéditeur a transmis.

L'un des faits qui ont eu le plus d'influence sur le développement de la télégraphie en permettant d'en diminuer le coût d'établissement a été la suppression du second fil des lignes télégraphiques et l'emploi de la *terre* comme circuit de retour. Il est vrai qu'un seul fil, c'est encore beaucoup pour les électriciens d'aujourd'hui... qui n'en veulent plus du tout !

D'ailleurs on a souvent recours actuellement à des appareils beaucoup plus perfectionnés que le Morse : Baudot, Hughes, etc., qui *impriment* en toutes lettres les messages transmis et accomplissent une besogne que dix appareils Morse ne pourraient abattre.

PRINCIPE DU TÉLÉPHONE

La plus merveilleuse application de l'électro-aimant est peut-être réalisée par le *téléphone*, ce fantastique instrument qui supprime les distances en permettant non plus seulement à la pensée, mais à la parole avec toutes ses délicatesses et toutes ses nuances, de franchir l'espace avec la vitesse de la lumière.

Et avec quelle simplicité sans pareille est atteint ce résultat prodigieux !

Examinons ce poste transmetteur (fig. 31) : un *microphone* M en est la pièce de résistance, constituée en général par un assemblage de pastilles ou crayons C à base de charbon, qui maintenues sous la plaque vibrante P de l'appareil, sont soumises pendant qu'on parle devant celle-ci à des pressions variables suivant avec une fidélité scrupuleuse les vibrations complexes de la parole. Or, ces pastilles, qui jouissent de la propriété de présenter une résistance électrique variable avec la pression à laquelle elles sont soumises, font partie d'un circuit comportant une pile K, la ligne L, et, à quelques centaines de mètres ou de kilomètres — la chose est de peu d'importance — le récepteur R que nous allons à son tour disséquer tout à l'heure.

Résultat : sous l'influence des vibrations sonores transmises par la plaque de l'appareil, le microphone transmetteur varie conti-

nuellement de résistance et ne laisse passer sur la ligne qu'un courant variable dont les variations sont scrupuleusement liées aux moindres ondulations sonores sorties de la bouche du causeur : quel sujet d'admiration que cette infinie souplesse de la plaque vibrante s'astreignant à suivre, sans en escamoter une seule, les vibrations sonores qui se succèdent, d'après les physiciens, au taux de plusieurs milliers *par seconde* !

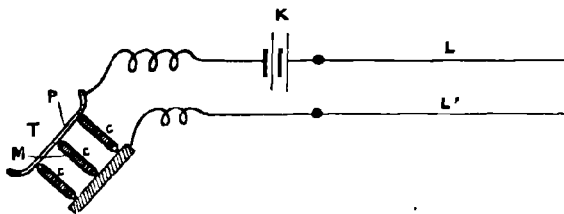


Fig. 91. — Principe du transmetteur microphonique.

Notre courant variable, porté, non sur l'aile des vents, ce qui aurait semblé autrefois le comble de la vitesse, mais sur quelque chose d'incomparablement plus rapide, arrive au récepteur.]

Celui-ci, s'il est possible, est encore plus simple que le transmetteur. C'est tout bonnement un électro-aimant à noyau aimanté, dont l'armature est la plaque vibrante réceptrice (fig. 92).

Notre courant variable pénètre dans l'électro, y provoque, par ses variations, des variations d'attraction toujours intimement liées, en

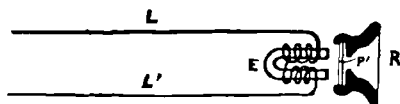


Fig. 92. — Principe du récepteur.

dépît de la distance, en dépît des intermédiaires franchis, aux moindres mouvements des lèvres du parleur ; sous cette influence, la plaque du récepteur se met donc à reproduire tous les mouvements de celle du transmetteur : ses vibrations ébranlent l'air et reproduisent la voix !

Bien entendu, les choses ne se passent pas dans la pratique avec cette aimable simplicité.

D'abord, pour les longues distances, la résistance de la ligne devenant très forte devant celle du transmetteur, les variations de celle-ci deviennent négligeables ; on est alors forcé d'amplifier les variations du courant en passant par l'intermédiaire d'une sorte de petit *transformateur*. N'insistons pas, les phénomènes d'induction,

dont la connaissance serait indispensable pour expliquer le rôle de ce transformateur, étant encore mystérieux pour nous.

En revanche, ce que nous pouvons comprendre dès à présent, c'est qu'un *poste* complet doit nécessairement comporter à la fois un transmetteur et un récepteur : ces deux appareils sont alors placés tous deux en dérivation sur la ligne, de telle sorte que le causeur commence par se téléphoner à lui-même, ce qui est peut-être une superfétation, mais non un inconvénient, attendu que chose curieuse, vous pouvez en faire l'essai, un monsieur qui crie même à tue-tête n'entend pas son téléphone le lui répéter, à moins que celui-ci ne soit bien mal réglé.

Ce que nous comprenons encore, c'est que transmetteur et récepteur ne seraient pas capables, même à eux deux, de permettre une application pratique de la téléphonie, car deux correspondants qui ont à s'en servir ne peuvent avoir le récepteur attaché à l'oreille 24 heures par jour, pour ne pas rater ce qu'ils ont à se dire. Téléphones *haut-parleurs* (d'Argy, etc.) mis à part, chaque poste téléphonique doit donc se compléter par un appareil d'avertissement qui est en général une simple sonnerie : le seul fait de la suspension du récepteur à un crochet *ad hoc*, lorsqu'on ne s'en sert pas, intercale cette sonnerie sur la ligne à place du récepteur et elle prévient bruyamment l'abonné quand un moment de conversation lui est réclamé. On conçoit dès lors l'inconvénient qu'il y a à ne pas raccrocher son récepteur à la fin d'une conversation.

Enfin, si le téléphone devait se borner à permettre la communication entre les deux mêmes personnes, comme nous l'avons admis jusqu'ici, sans doute n'en resterait-il pas moins un merveilleux outil, mais son rôle social serait singulièrement moins important. Il a fallu s'ingénier à rendre possible les communications entre tous les abonnés d'une ville et même d'un pays : c'est ici qu'apparaît le *bureau central*, où se fait cette cuisine par l'intermédiaire de la demoiselle du téléphone, bête noire des abonnés — pas toujours par sa faute, la pauvre, car elle a plus de besogne que le commun des mortels ne se l'imagine, et les abonnés eux-mêmes sont plus souvent qu'à leur tour terriblement grincheux !

LE TÉLÉGRAPHONE

Mais je suppose que le correspondant appelé ne répond pas à son téléphone ?

Actuellement, c'est tant pis pour lui — ou pour l'autre, suivant les cas, à moins que ce ne soit tant pis pour les deux.

Demain, il en ira autrement, grâce à une étonnante invention de l'ingénieur danois Poulsen, un des *clous* de l'électricité à la dernière Exposition (fig. 93) :

A l'aide d'un courant spécial lancé à propos, l'appelant, constatant que l'appelé n'est pas là, mettra en branle chez ce dernier un ensemble de 2 cylindres parallèles O, O' entre lesquels se déroulera un mince fil d'acier F de un demi-millimètre de diamètre. Ce fil passant entre les deux branches d'un électro-aimant récepteur spécial E, subira les variations d'aimantation provoquées par la parole de l'appelant, lesquelles s'inscriront d'une manière indélébile dans le fil d'acier sous forme d'un magnétisme rémanent variable en chaque point

L'appelé, en rentrant, constatant que ses cylindres récepteurs ont tourné, s'empressera de prendre connaissance du message *inscrit dans le fil*.

Il lui suffira pour cela de faire repasser celui-ci — dans le même sens, car sans cela, quelle cacophonie ! — entre les branches de l'électro

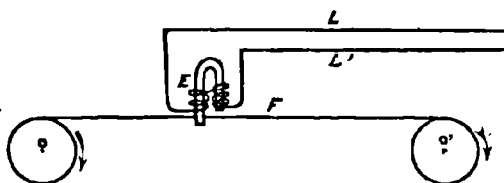


Fig. 93. — Principe du télégraphe.

ad hoc E préalablement relié au récepteur téléphonique.

Le phénomène inverse de celui de l'inscription se produira alors, c'est-à-dire que sous l'influence des variations d'aimantation du fil, de forces électromotrices d'induction prendront naissance dans l'enroulement de l'électro et provoqueront à travers le récepteur un courant variable exactement semblable à celui qu'y aurait provoqué directement la parole du correspondant : D'où une reproduction merveilleusement fidèle de la voix par ce *télégraphe*, dernier *cri* — c'est bien le cas de le dire — du phonographe, exempt de cet accent nasillard que valaient à l'invention d'Edison le frottement des organes complexes de l'instrument, la déformation des ondes résultant de l'effort mécanique nécessaire pour enfoncer le stylet dans la cire, etc. Ici, plus de ces frottements, plus de ces efforts préjudiciables : le fil enregistreur passe libre, sans aucun contact, entre les deux branches de l'électro et attrape pour ainsi dire au vol toutes les impressions qu'il aura plus tard à nous restituer.

LES LAMPES A ARC

L'électro-aimant constitue encore l'âme de ces lampes à arc qui inondent de leur admirable lumière nos villes et nos usines.

On en connaît le principe, découvert par Davy :

Deux crayons de charbon spécial, très conducteurs, analogues à ceux employés dans les piles, soumis à une différence de potentiel d'une cinquantaine de volts, sont amenés au contact, puis écartés à quelques millimètres l'un de l'autre ; l'espace qui les sépare s'illumine d'une flamme qui n'est autre chose que l'étincelle électrique, et que Davy a baptisée du nom d'*arc électrique* parce que si on augmente la différence de potentiel agissante et si en même temps on écarte davantage les charbons, on voit la flamme se courber en un véritable arc réunissant les pointes des deux charbons (fig. 94).

Cette flamme est très faiblement lumineuse et ce n'est pas du tout à l'*arc* que les lampes à *arc* doivent leur éclat sans rival.

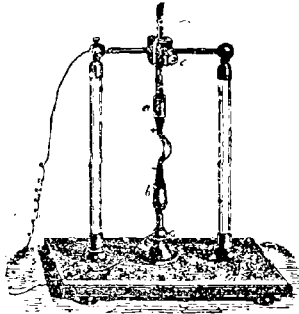


Fig. 94. — L'arc électrique : expérience de Davy.

Plus des 9 dixièmes de la lumière provient de l'extrémité du charbon positif, qui se creuse en un éblouissant *cratère* (fig. 95), tandis que le charbon négatif, peu lumineux, se taille en pointe pendant le fonctionnement. Et comme généralement on se propose d'éclairer au-dessous de la lampe, cette disposition des charbons oblige naturellement à mettre *en haut* le charbon positif.

Quelle est la cause de cette transformation si intéressante de l'énergie électrique en énergie lumineuse ? C'est que presque toute la résistance du circuit est localisée à la sortie du courant du charbon positif, bon conducteur, dans l'air, mauvais conducteur, qui sépare les deux charbons. Toute l'énergie électrique fournie au circuit vient donc se dépenser là, dans un espace très petit : d'où un développement énorme de chaleur qui a pour effet d'amener le charbon positif à la température la plus haute qu'il puisse supporter

celle de son *ébullition*, température qu'on ne peut effectivement pas plus dépasser avec le charbon qu'on ne saurait, quelle que soit l'intensité du foyer, dépasser la température de 100° dans l'ébullition de l'eau sous la pression atmosphérique.

La température de l'arc est donc immuable, soit 3500° environ, d'après les savantes recherches de M. Violle, et l'éclat de toutes les lampes à arc est *le même*.

Lorsqu'on augmente le courant qui les alimente, on n'augmente donc pas du tout l'éclat du cratère, mais simplement la *surface* incandescente.

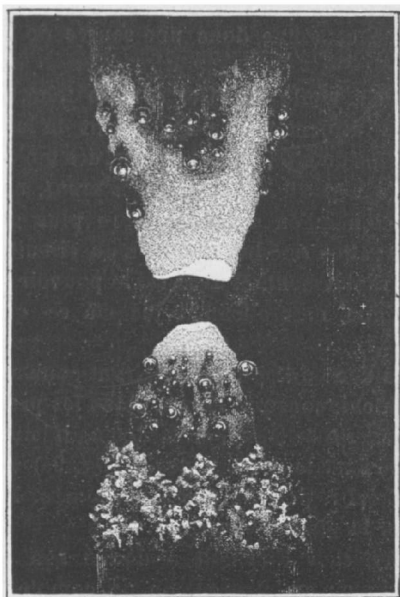


Fig. 95. — Aspect des charbons.

Pour pouvoir augmenter encore la température, et avec elle le rendement lumineux, il faudrait trouver un autre corps conducteur de l'électricité, possédant un point d'ébullition supérieur à celui du carbone et comme ce dernier, comme l'arsenic et quelques rares autres corps, jouissant de la curieuse propriété de *bouillir à l'état solide*.

Ou alors il faudrait procéder autrement et entrer dans une voie qui paraît avoir été ouverte avec succès par les recherches toutes récentes de l'Américain Bremer : cet inventeur mélange en forte proportion dans les matières destinées à la préparation de ses charbons des substances de la famille de celles qui sont employées dans le

bec Auer, chaux, magnésie, etc., et qui sont douées, pour des raisons encore peu connues, de la singulière propriété de transformer sous la forme lumineuse énormément de l'énergie qu'on leur applique sous forme calorifique. Ces matières se trouvant, lors du fonctionnement de la lampe, soumises directement (1) à l'énorme température développée par l'ébullition du carbone qui les entoure, l'éclat et le rendement lumineux deviennent merveilleux : la bougie serait produite avec 0,2 watt à peine, alors qu'il en faut 0,4 à 0,5 dans les lampes à arc ordinaires, 3 à 3,5 dans les lampes à incandescence, et l'équivalent de quatre-vingts à quatre-vingt-dix dans la bougie de stéarine!

L'arc électrique constitue donc une source de lumière à nulle autre pareille.

Mais lorsqu'on a voulu l'utiliser comme telle, on s'est heurté à une très grosse difficulté ; par suite, tant de la combustion des charbons dans l'air que d'un actif transport des molécules de carbone du positif vers le négatif, les charbons *s'usent*, surtout le positif, malgré la précaution qu'on a de le prendre plus gros ; l'écart augmente rapidement ainsi que la résistance du circuit, de sorte que le courant diminue rapidement, et avec lui le pouvoir lumineux : cette progression continue naturellement jusqu'à ce qu'extinction s'en suive.

On n'obtiendra donc un pouvoir éclairant constant qu'à la seule condition de maintenir constant l'écart. Dans les premiers temps qui suivirent la découverte de Davy, on était peu difficile, et pour cause : on se contentait de fixer le charbon positif (fig. 94) à une crémaillère qu'un préposé spécial réglait de temps en temps. Peu industriel, ce procédé a dû céder la place à d'autres.

Le célèbre physicien Foucault a donné son nom au premier *régulateur* électrique ; maintenant, on ne compte plus ces sortes d'appareils, l'inventeur de lampes à arc s'étant à peu près aussi répandu dans ces dernières années que le chercheur de mouvement perpétuel, ce qui n'est pas peu dire. Hâtons-nous de l'ajouter, il ne résulte pas de ce qui précède qu'il y ait aujourd'hui *beaucoup* de bonnes lampes à arc : ceci n'a avec cela absolument aucun rapport...

Essayons de nous rendre compte de quelques-uns des principes qui sont mis à profit dans ces appareils.

Régulateurs en série ; lampe Cance. — Dans une première classe de régulateurs, dits régulateurs *en série*, on met à profit le

(1) Et non plus indirectement, comme dans l'ancienne lampe Soleil.

fait que quand l'écart augmente, l'intensité du courant diminue. Dans ce cas, on intercale en série avec l'arc (fig. 96) un électro-aimant à gros fil E dont l'armature, par suite de la diminution d'attraction, effectue des mouvements qui ont pour effet de ramener les charbons à leur écart normal.

Ainsi, c'est le courant lui-même qu'on charge d'entretenir sa propre santé, et cela paraît une excellente idée : quel médecin peut avoir de nous plus de soins que nous-mêmes !

Par exemple, la figure schématique 96 indique un moyen, d'ailleurs très mauvais, d'obtenir ce résultat, puisque quand l'intensité diminue, l'effet des ressorts antagonistes tend à diminuer l'écart. L'allumage se fait ici très simplement, car les charbons étant en

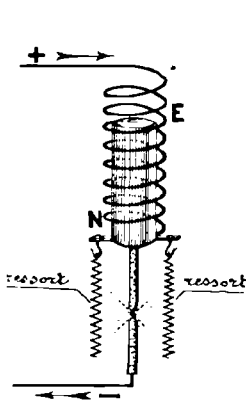


Fig. 96. — Schéma d'un mauvais régulateur en série.

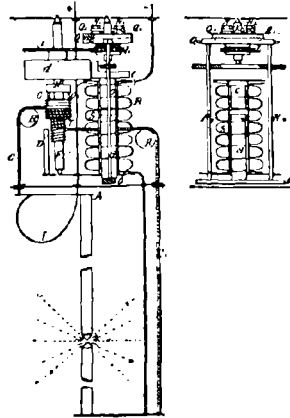


Fig. 97. — Régulateur Cance.

contact au moment où on lance le courant, l'attraction très énergique qui se produit détermine la séparation brusque des charbons, entre lesquels l'arc jaillit aussitôt.

Pourquoi donc le système est-il si mauvais ?

Parce que, au fur et à mesure que les charbons s'usent, le noyau N sort de plus en plus de l'électro et finit par échapper à son action, auquel cas les charbons finissent par tomber en contact au bout d'un temps assez court.

On conçoit donc que, en général, il convient de s'arranger pour que l'armature reste ou revienne toujours sensiblement à la même place en dépit de l'usure des charbons (1).

(1) On peut cependant citer comme exception à cette règle les lampes du type Pilsen dans lesquelles les électros, solidaires des charbons, peuvent effectuer, grâce à leur forme conique allongée, de très grands

Par exemple, dans la lampe Cance, l'une des plus connues (fig. 97) la diminution d'attraction a seulement pour effet de desserrer un frein qui permet au porte-charbon supérieur de descendre par son poids jusqu'au point où, l'intensité étant redevenue normale, le frein se resserre. Ces mouvements se font par fractions insensibles, comme il convient pour assurer la fixité de l'éclairage. Mais dans ce cas et les analogues, un dispositif spécial est nécessaire pour assurer l'allumage initial ; ce mécanisme se réduit en général à un électro-aimant traversé par le courant, et qui attire un noyau ou une armature fixée à un des charbons, de manière à provoquer la séparation de ceux-ci.

Régulateurs en dérivation ; lampe Brianne. — Dans une autre classe de régulateurs — régulateurs *en dérivation*, — au lieu de profiter des variations de courant, on s'adresse à la différence de

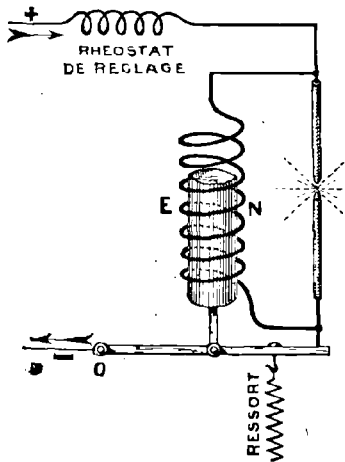


Fig. 98. — Schéma d'un mauvais régulateur en dérivation.

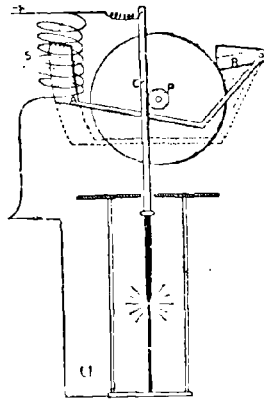


Fig. 99. — Schéma d'un régulateur Brianne.

potentiel aux bornes de l'arc, qu'on s'arrange de manière à faire varier avec l'écart par l'addition, en série avec l'arc, d'une résistance ou *rheostat de réglage*.

La présence de cette résistance gaspilleuse d'énergie est un mal nécessaire ; elle est en effet indispensable pour que la diff. de pot. aux bornes de l'arc présente la variabilité désirée, car si cet arc était directement branché sur la différence de potentiel constante de la

déplacements, et les lampes Gaiffe, comportant des électros dont un mode spécial d'enroulement rendait l'attraction sensiblement constante.

canalisation d'éclairage, soit E , les volts aux bornes resteraient forcément toujours égaux à E .

On ne pourrait donc pas régler de cette façon.

Au contraire, avec la résistance R en série, on absorbe une partie RI de la diff. de pot. E , partie d'autant plus petite que le courant qui alimente l'arc est moindre, — c'est-à-dire que les charbons sont plus éloignés — de telle sorte que la diff. de pot. qui subsiste aux bornes de l'arc augmente avec l'écart et réciproquement.

Si alors, en dérivation sur ces bornes de l'arc, nous branchons la bobine de fil fin d'un électro E , nous pourrions utiliser les augmentations d'attraction corrélatives des augmentations d'écart pour provoquer par l'intermédiaire de l'armature certains mouvements tendant à ramener l'écart à la même valeur.

Le schéma fig. 98 indique pour y arriver un moyen très simple, mais qui serait détestable en pratique pour des raisons analogues à celles qui ont été développées au sujet du montage de la figure 95. Ici encore, il est le plus souvent nécessaire que le noyau revienne toujours à la même position.

C'est ainsi que dans la lampe Briante, une augmentation d'écart se traduit d'abord par l'enfoncement plus grand du noyau A de l'électro (fig. 99).

Mais ce noyau est solidaire d'un secteur denté R qui, lorsque l'attraction est suffisante, désengrène le volant P : Sous l'action de la pesanteur, le charbon supérieur se rapproche alors de l'autre, ce qui fait diminuer la diff. de pot. aux bornes, et retomber le noyau : le secteur denté réengrène le volant et l'écart se maintient à sa nouvelle valeur jusqu'à ce que le précédent ordre de faits se renouvelle.

Quant à l'allumage initial, il se fait ici sans aucun mécanisme spécial :

Au repos, le noyau, n'étant pas attiré, est au bas de sa course et un léger écart sépare les charbons. Vient-on à fermer l'interrupteur qui commande la lampe, la totalité de la diff. de pot. agissante se trouve portée sur l'électro, qui attire énergiquement le noyau. Le secteur denté désengrène donc les charbons : ceux-ci viennent au contact, d'où un court-circuit qui fait tomber à zéro la diff. de pot. aux bornes. Le noyau retombe et sépare les charbons : l'arc jaillit.

CHAPITRE QUATORZIÈME

PRINCIPE DES MACHINES

A COURANT CONTINU

Revenons au déplacement des conducteurs dans les champs magnétiques et proposons-nous, à leur aide, de produire une f. é. m. *constante*, identique à celle des piles.

Da'près ce qui a été dit précédemment, vous concevez que nous pourrions obtenir une telle f. é. m. constante en déplaçant régulièrement notre conducteur en ligne droite en travers des lignes de force parallèles et également espacées d'un champ magnétique *uniforme* et indéfini. Malheureusement, si cela ne nous coûte pas cher d'imaginer un champ indéfini, il est évidemment impossible d'en réaliser un pratiquement. Et comme nous ne pouvons disposer en pratique que d'un champ restreint, il faut bien que notre conducteur, à un moment donné, revienne sur ses pas et rentre dans le champ si nous voulons qu'il continue à couper des lignes de force. Mais il produit alors, nous l'avons vu, une f. é. m. inverse de lors de son premier mouvement (page 151).

Conséquence, on ne peut obtenir directement à l'aide du déplacement des conducteurs *que des courants alternatifs*, et il faut avoir recours à des *trucs*, à des artifices spéciaux pour obtenir du courant continu.

Beaucoup d'attention ne sera pas de trop pour comprendre comment on y arrive.

Nous allons d'abord voir comment varie la f. é. m. induite dans une spire conductrice A tournant à vitesse constante autour d'un axe XX' dans un champ magnétique *uniforme*

que nous supposons engendré par les deux *masses polaires* N et S. Par convention, nous représenterons par un gros trait la partie de la spire qui est de notre côté (fig. 100).

Suivant l'interprétation que nous avons donnée à la fin du chapitre théorique précédent, la f. é. m. induite dans cette spire dépend à chaque instant de la variation du flux magnétique embrassé. Or, bien que la spire se déplace avec une vitesse uniforme, cette variation de flux est loin d'être elle-même uniforme. Quand la spire est dans la région voisine de 1, il est visible qu'elle se déplace presque *parallèlement* aux lignes de force, de sorte que le nombre total de ces lignes qu'elle embrasse, qui est d'ailleurs très grand, varie peu. Donc,

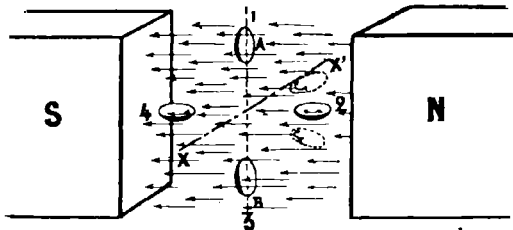


Fig. 100. — Variations de la f.é.m. dans une spire tournant dans un champ uniforme f. é. m. presque nulle en cette région. Et même, exactement en 1, il n'y a pas de variation du tout et la f. é. m. y est nulle. Mais, à mesure que la spire avance vers 2, son obliquité par rapport au champ augmente de plus en plus — et aussi, de plus en plus vite — ; le nombre des lignes de force embrassées diminue donc de plus en plus rapidement, et la rapidité de la *variation* du flux atteint son maximum en 2, précisément là où le flux lui-même est nul.

La f. é. m. subit donc une augmentation progressive depuis 1 où elle était nulle jusqu'en 2 où elle atteint son maximum. Ainsi la f. é. m. est *maxima* juste au moment où le flux qui traverse la spire est *nul* : Rappelez-vous que c'est la *variation* du flux embrassé qui doit être *rapide*, et non le flux embrassé lui-même qui doit être grand (1).

(1) Il est essentiel de bien saisir ces particularités de la variation de flux. Un petit graphique y aidera beaucoup. Figurons la spire MN (fig.101), vue par sa « tranche », en des positions successives équidistantes a, b, c, d, e du premier quart de tour. En une quelconque de ces positions, c par exemple, le flux embrassé est évidemment le même que pour une spire

Arrivé en 2, le flux embrassé, qui *diminuait* jusque-là, se met à *augmenter* : le courant doit donc changer de sens. Et pourtant, non ! Car en même temps, le circuit lui-même s'inverse, parce que les lignes de force qui traversaient jusque-là la spire par sa *face inférieure* (voyez fig. pointillée au-dessus de 2) la traversent maintenant par sa *face supérieure*, (voyez fig. pointillée au-dessous de 2) ce qui, pour notre spire, est la même chose que si les lignes de force du champ *avaient changé de sens*. Ces deux effets inverses se compensent évidemment, et le courant continue à circuler dans le même sens à travers la spire.

A partir de cette position 2, l'inclinaison de la spire va varier de moins en moins vite jusqu'en 3, où, comme en 1, elle se déplacera parallèlement aux lignes de force et ne les coupera plus du tout pendant un court instant. Donc, en résumé, la f. é. m. qui de nulle en 1 était devenue progressivement maxima en 2, diminue progressivement à partir de 2 pour redevenir nulle en 3.

En 3, les choses changent.

Le flux embrassé, qui avait augmenté de 2 à 3, se met à

fictive $M' N'$ non oblique aux lignes de force, cette spire fictive étant comme on dit la *projection* de $M N$ sur un plan perpendiculaire au champ.

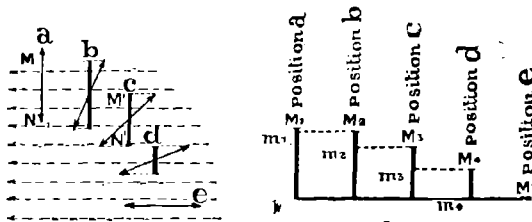


Fig. 101.

Figurons de même les projections de $M N$ pour les 4 autres positions et portons-les à la suite les unes des autres en M_1, M_2, \dots, M_5 . Les diminutions successives éprouvées par le flux embrassé lors du passage de a en b, puis de b en c, etc., correspondant évidemment à $M_1m_1, M_2m_2, M_3m_3, M_4m_4$, et il est bien visible sur la figure que très petite de a à b, la diminution devient plus grande de b à c, plus grande encore de c à d et atteint son maximum de d à e. Or, ces diminutions sont obtenues en des temps égaux, puisqu'elles correspondent à des déplacements égaux de la spire, de sorte que la variation du flux est de plus en plus rapide, depuis l'instant où le flux embrassé lui-même est maximum jusqu'au moment où il est nul. On pourra continuer le raisonnement pour les 3 autres quarts de tour.

diminuer. Il y a donc *inversion* de f. é. m., mais cette fois, la spire, elle, ne s'inverse pas et continue à se présenter par la même face aux lignes de force du champ. Ici, l'inversion de la f. é. m. est donc effective et le courant circule maintenant en sens inverse. Pour les mêmes raisons que tout à l'heure, cette f. é. m. ira en augmentant jusqu'en 4 où elle sera maxima, dépassera cette position *sans s'inverser*, de même qu'en 2, puis décroîtra et redeviendra nulle en 1, où elle s'inversera de nouveau pour continuer indéfiniment le même cycle de variations.

Pour nous résumer :

1° Pendant toute la moitié de sa course située à gauche de la ligne A B, la spire est le siège d'une f. é. m. *toujours de même sens*, qui, nulle en 1, devient maxima en 2 pour s'annuler en 3, où elle s'inverse.

2° Pendant toute la moitié de droite de sa course, la spire est le siège d'une f. é. m. *toujours de même sens, inverse de la précédente*, et qui, nulle en 3, devient maxima en 4 pour s'annuler de nouveau en 1 où elle s'inverse.

Si vous avez bien saisi ce qui précède, le fonctionnement de l'anneau Gramme ne présentera pour vous aucune difficulté.

Admettons que toute la circonférence parcourue tout à l'heure par notre spire unique est garnie de spires semblables reliées les unes aux autres (fig. 102). D'après ce qui précède, si, à un instant quelconque nous séparons ces spires par la pensée en deux moitiés par la ligne A B, toutes les spires à gauche de cette ligne sont le siège de f. é. m. de *même sens*, et comme elles sont naturellement couplées en série, toutes ces f. é. m. *s'ajoutent* : ainsi, il existe entre les deux extrémités de cette moitié de l'*anneau* une f. é. m. égale à la somme de toutes les f. é. m. partielles et dont le pôle + est par exemple en A (1),

(1) On détermine aisément le sens du courant induit dans une spire et par suite celui de la f. é. m. grâce à l'observation suivante : Comme tout circuit parcouru par un courant le circuit induit produit un champ pendant toute la durée du courant induit. Or, la règle du tire-bouchon de Maxwell vous permettrait de trouver bien facilement le sens du courant induit lui-même, si vous connaissiez le sens de ce champ : c'est ce qui vous sera facile lorsque vous saurez que le flux magnétique produit par le courant induit tend à *s'opposer à la variation* du flux inducteur qui lui a donné naissance. Cette loi, connue sous le nom de *loi de Lenz*, n'est qu'un cas particulier de cette loi générale de mécanique qui veut que la *reaction*

De la même façon, les spires de la moitié de droite de l'anneau sont toutes le siège de f. é. m. de même sens entre elles, mais opposées à celles de la moitié de gauche. Ces spires ajoutent donc elles aussi leurs f. é. m. partielles pour fournir entre les deux points A et B une f. é. m. totale égale à leur somme et *opposée* à la f. é. m. totale de l'autre moitié, c'est-à-dire que son pôle positif se trouve en regard de celui de l'autre, en A. Comme les choses sont identiques de part et d'autre de l'axe, ces deux f. é. m. totales sont non seulement opposées, mais *égales* entre elles.

En outre, remarque capitale, la f. é. m. totale développée dans la moitié de droite *ou* la moitié de gauche de l'anneau

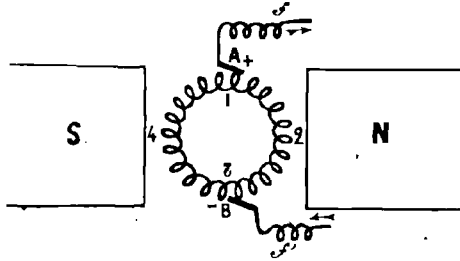


Fig. 102. — Principe de l'anneau Gramme.

reste *CONSTANTE*, car bien que la f.é.m. de *chacune* des spires de droite, par exemple, soit variable, la diminution dans les spires allant de 2 vers 3 est toujours compensée par l'augmentation dans celles allant de 1 vers 2, de sorte que la somme, elle, reste constante.

Nous pouvons donc considérer notre anneau comme constituant deux sources de f. é. m. *constantes* et égales entre elles, reliées entre A et B par leurs pôles de même nom. Si l'anneau ne travaille sur aucune résistance extérieure, ces deux f.é.m. se font équilibre, car elles sont opposées l'une par rapport à l'autre : l'anneau n'est alors le siège d'aucun cou-

soit de sens contraire à l'action. Si par exemple, le flux inducteur augmente, le flux provenant du courant induit tend à *empêcher cette augmentation* : il faut pour cela qu'il soit de *sens contraire* au flux inducteur : le sens de ce flux induit ainsi déterminé, la règle de Maxwell (page 156) permet de trouver facilement le sens du courant induit lui-même.

Si, au contraire, le flux embrassé par la spire diminue, le flux induit tend à *empêcher cette diminution* : il faut pour cela qu'il soit de *même sens* que le flux inducteur : et appelant Maxwell à notre secours, nous concluons encore de là le sens du courant induit.

rant et ce n'est que justice, puisque nous ne lui faisons fournir aucun travail extérieur. Sa rotation ne coûte alors que la dépense d'énergie pour vaincre les frottements sur les paliers.

Mais si nous relions les deux pôles communs A et B par un circuit extérieur, les deux sources fonctionneront comme deux piles montées en quantité (voir page 88) et enverront chacune dans le circuit une moitié du courant total sous une tension représentée par la f. é. m., continue et constante développée dans chaque moitié de l'anneau.

Tel est, théoriquement au moins, l'*anneau Gramme*.

Ceci, pourtant, ne vous satisfait pas encore.

D'abord, comment faire pour relier le circuit extérieur à ces

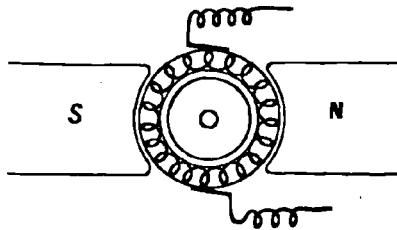


Fig. 103. — Disposition pratique de l'anneau Gramme.

deux points A et B d'un anneau qui tourne à quelque mille ou douze cents tours par minute? Ce problème si embarrassant n'est pas bien difficile à résoudre parce que ces deux points A et B sont *fixes* dans l'espace. Vous pouvez vous imaginer aisément que le fil de l'anneau soit *dénuqué* extérieurement sans que pourtant les spires consécutives soient en contact métallique, ce qui les transformerait en circuits fermés sur eux-mêmes, lesquels seraient traversés en pure perte par des courants énergiques.

Il suffira alors de placer en A et B des frotteurs métalliques élastiques — des *balais*, pour les appeler par leur nom — qui enverront au circuit d'utilisation le courant produit.

Passons aux dispositions employées en pratique.

D'abord, il est bien certain que nous ne pourrions faire tourner notre hélice dans l'espace à une pareille vitesse si elle n'était enroulée sur un support rigide en forme d'anneau. Cet anneau est supporté lui-même par l'axe O qui lui transmet le mouvement de rotation nécessaire.

Avec quelle matière constituerons-nous cet anneau ? Vous vous doutez de la réponse.

Si les lignes du champ inducteur avaient à parcourir dans l'air le long trajet que nous avons représenté sur la figure 102, elles y éprouveraient une résistance magnétique énorme et le champ ne pourrait pas être intense, ce qui est pourtant, nous l'avons vu, indispensable à la production d'une grande f.é.m.

Aussi, on constitue l'anneau *en fer* : les lignes de force y trouvant un chemin infiniment plus facile, produisent une aimantation extrêmement intense, grâce à la faible résistance magnétique du circuit.

En même temps, on se garde bien d'écartier l'une de l'autre comme le représentait la figure 102, les deux masses polaires magnétiques N et S. On les rapproche au contraire en forme de mâchoires (fig. 103) en laissant juste entre les deux *épauvements polaires* ainsi obtenus la place nécessaire pour y loger l'anneau, de manière à réduire au minimum la résistance magnétique. Entre les mâchoires et l'anneau, on réserve tout juste le petit intervalle, ou *entrefer*, strictement nécessaire au jeu de l'anneau, qui doit être parfaitement centré.

Et c'est à juste titre qu'on s'attache à réduire cet entrefer, car si petit qu'il soit, l'air est si peu perméable comparative-ment au fer, que c'est là que se localise presque toute la résistance magnétique, si nuisible à l'intensité du champ.

COURANTS DE FOUCAULT

Si nous faisons tourner à toute vitesse dans un champ intense un anneau constitué, de la façon que nous venons de dire, par une masse de fer enroulée de fil isolé, nous ne tarderions pas à être arrêtés par une forte odeur de roussi.

Pourquoi ?

Faisons (f. 104) une expérience bien curieuse et très simple :

Suspendons à un fil de soie *f*, entre les deux pôles d'un électro en fer à cheval non excité, une petite masse métallique, une petite sphère de cuivre S, par exemple : tortillons ce fil entre nos doigts de manière à communiquer à la sphère un mouvement de rotation rapide. Elle continue à tourner rapidement pendant un certain temps, s'arrêtant un moment pour

répartir en sens contraire, et ainsi de suite. Ce n'est pas cela que j'ai la prétention de vous faire juger extraordinaire.

Mais excitons l'électro.

La sphère, lancée au galop, s'arrête tout d'un coup !

Cette masse métallique coupe des lignes de force en tournant dans le champ que nous venons de créer. Il s'induit donc dans son intérieur une certaine f. é. m., et comme cette masse constitue, en somme, un circuit fermé de faible résistance, sous l'influence de cette f. é. m., des courants intenses ont pris naissance. Ce sont des *courants de Foucault*, ainsi nommés du physicien français qui les découvrit.

Or, ces courants se transforment en chaleur, donc absorbent de l'énergie. Cette énergie, où la trouver ? Dans celle que

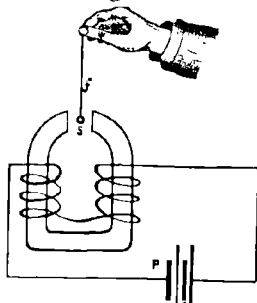


Fig. 101. — Expériences sur les courants de Foucault.

nous avons emmagasinée dans la masse sous forme de mouvement. Mais cette source d'énergie est bien faible ; elle est bientôt tarie et presque instantanément la masse s'arrête.

Comme la petite masse, notre anneau de fer massif se déplace dans un champ intense et est le siège de courants de Foucault. Mais lui ne s'arrête pas, puisque nous dépensons une énergie suffisante pour entretenir son mouvement de rotation. Ces courants de Foucault continuent donc à se produire, à se dépenser en chaleur et à élever progressivement la température de la masse.

D'où, à un moment donné, carbonisation des fils et production de cette odeur caractéristique que votre nez — inquiet à juste titre — vous aurait révélé.

Il faut donc éviter à tout prix ces courants de Foucault, et cela, non seulement parce qu'ils rôtissent nos fils, mais encore parce qu'ils absorbent en pure perte énormément d'énergie.

On arrive à ce résultat en sectionnant l'anneau, en le constituant par des disques de tôle mince isolés par du papier, empilés les uns sur les autres, ou par des fils de fer vernis. Comme cela, chaque tôle ou chaque fil, disposé *dans le sens du champ*, n'est traversé que par un petit nombre de lignes de force et n'est par conséquent le siège que d'une f. é. m. très faible.

De plus, en diminuant les dimensions des masses métalliques, on augmente la résistance électrique des circuits fermés et par suite on affaiblit l'intensité des courants produits.

Pour ces deux raisons, avec des tôles d'un demi-millimètre d'épaisseur, la proportion d'énergie qui est absorbée par les courants de Foucault devient très faible et ne diminue pas beaucoup le rendement de la machine. Mais il faut noter qu'ils continuent à se produire tant que le champ existe, et alors même qu'on ne fait pas débiter l'anneau sur un circuit extérieur(1) : les courants de Foucault, c'est, pour les dynamos, l'attaque à circuit ouvert du zinc des piles.

Remarquez — la remarque a sa valeur — que malgré le sectionnement de l'anneau, les lignes de force n'en continuent pas moins à circuler d'un bout à l'autre de l'anneau dans du fer, puisque les tôles sont orientées dans le sens du champ, en travers de l'anneau ; ainsi, l'atténuation des courants de Foucault est obtenue sans augmenter sensiblement la résistance magnétique.

Observons encore que s'il est indispensable de feuilleter l'induit, il est tout aussi inutile de feuilleter l'*inducteur* ; c'est-à-dire le système producteur du champ, car ce champ restant constant, l'inducteur ne s'y déplaçant pas, il n'y a pas dans sa masse de variations de flux, partant, pas de courants de Foucault.

Mais par contre, il serait indispensable de feuilleter une pièce métallique qui, même *fixe*, serait traversée par un champ magnétique rapidement variable.

Nous verrons l'application de cette observation à propos des bobines de Ruhmkorff et des transformateurs.

(1) Sauf cependant dans les dynamos *en série* (voir plus loin) dans lesquels le champ inducteur est provoqué par le débit même de la machine.

HYSTÉRÉSIS

Indépendamment des courants de Foucault, l'induit des dynamos est encore soumis à une autre cause de pertes pendant sa rotation dans le champ inducteur.

Cette cause, c'est l'*hystérésis*, d'un mot grec qui signifie... mais ne prenons pas de mauvaises habitudes !

D'autant plus que l'étymologie en question est précisément cause que ce phénomène fort simple est la plupart du temps très mal compris.

On appelle ainsi un phénomène en vertu duquel le fer soumis à l'action d'un champ magnétique subit une sorte de déformation moléculaire analogue à la déformation d'un ressort dont on a dépassé la limite d'élasticité.

Le *magnétisme rémanent* est une des manifestations de cet hystérésis : le fer qui a été soumis à l'action d'un champ magnétique devrait complètement se désaimanter lorsque ce champ disparaît, mais en vertu de son hystérésis, il reste toujours aimanté partiellement, de même qu'une lame de ressort dont on a dépassé la limite d'élasticité ne revient jamais à sa position d'équilibre initiale et reste déformée indéfiniment.

Quelquefois, rarement, l'hystérésis est une bonne chose : Ainsi, nous verrons tout à l'heure que Wheatstone et Siemens ont été fort heureux de trouver le magnétisme rémanent pour en faire la base de l'auto-excitation des dynamos. Mais pour un pauvre service, de combien de mauvais tours ne sont pas redevables à l'hystérésis les électriciens, dont il fausse les instruments de mesure, dont il empêche les dynamos d'être des outils tout à fait merveilleux !

Il est en effet aisé de se rendre compte que ce phénomène doit se traduire dans les dynamos par des pertes d'énergie importantes.

Tirons alternativement vers la droite, puis vers la gauche, une lame de ressort verticale fixée à l'une de ses extrémités. Agissons d'abord modérément, sans dépasser la limite d'élasticité : l'énergie que nous dépensons s'emmagasine sous forme de tension des molécules et sera restituée intégralement lorsque

la lame reviendra en arrière; donc, ici, le ressort ne s'échauffe pas.

Mais amplifions le mouvement, de manière à *dépasser* la limite d'élasticité : à chaque changement de sens, nous devons détruire la déformation permanente résultant de la traction précédente et ceci détermine des frottements moléculaires à la faveur desquels une partie de l'énergie que nous dépensons apparaît sous forme de *chaleur*. Ce dégagement de chaleur devient même très intense si nous poussons ces frottements moléculaires à l'extrême, ce qui est le cas par exemple quand, faute de pinces coupantes, nous tordons pour le rompre un fil de fer entre nos doigts impatients. Or, puisque chaque fois que nous magnétisons le fer, nous lui faisons subir une déformation permanente, il n'est pas étonnant que si nous le soumettons à des variations rapides nous perdions, sous forme d'échauffement en frottements moléculaires, une partie de l'énergie appliquée. Ce n'est pas pour une autre raison que l'hystérésis fait chauffer le fer des induits de dynamos, qui sont soumis à des variations d'aimantations extrêmement intenses et énergiques, puisque le champ qui les traverse s'inverse deux fois par tour par suite de leur rotation.

D'après cette explication, il est bien évident que malgré qu'ils se manifestent tous deux de la même façon, par l'échauffement des masses de fer soumises aux variations de champ, hystérésis et courants de Foucault sont deux phénomènes *absolument distincts*.

L'hystérésis ne dépend que du volume du fer qui lui est soumis: on ne le change en quoi que ce soit en feuilletant ce fer, tandis qu'on atténue ainsi autant qu'on veut les courants de Foucault. En outre l'importance des pertes par hystérésis est constante pour un tour, *quelle que soit la vitesse*, de même que la déformation permanente d'un ressort dont on dépasse la limite d'élasticité est atteinte immédiatement, quelle que soit la vitesse avec laquelle on tire la lame; au contraire, l'énergie absorbée dans un tour par les courants de Foucault est d'autant plus grande que la vitesse est plus grande.

En n'employant pas des vitesses trop considérables et en poussant assez loin la division du fer, on peut donc arriver à réduire à peu de chose les pertes par courants de Foucault,

tandis que pour l'hystérésis, il n'y a rien d'autre à tenter que de prendre du fer de bonne qualité et de ne pas le soumettre à des déformations moléculaires extrêmes, c'est-à-dire à des champs extrêmement intenses.

Si ces conditions sont réalisées, les pertes par hystérésis et par courants de Foucault sont à peu près égales et ne doivent pas dépasser 5 à 6 0/0.

Vous vous souviendrez en tout cas, qu'en dépit des étymologistes et de pas mal d'électriciens, l'hystérésis n'est pas un retard à l'aimantation !

COLLECTION DU COURANT

Revenons à notre anneau Gramme.

En pratique, on ne s'amuse pas, au moins dans la plupart des cas, à dénuder la surface extérieure des fils de l'induit pour y faire frotter des balais (1). La vitesse à la périphérie est trop grande, les fils seraient vite coupés par le frottement et en outre cette partie de l'anneau est généralement peu accessible, puisqu'elle est enserrée (voyez fig. 103) entre les deux mâchoires du système inducteur.

On se sert donc, pour recueillir le courant, d'un *collecteur* que représente la figure 105 et qui, solidaire de l'anneau, est calé sur le même arbre que lui. Les différentes sections du collecteur, lames de cuivre séparées par une matière isolante, sont reliées à des points équidistants du fil de l'anneau et sont par conséquent portées au même potentiel que ces points. La répartition du potentiel sur le collecteur est donc la même que sur l'anneau, et on fait alors frotter les balais sur les points de ce collecteur correspondant aux points A et B de l'anneau, ou plutôt légèrement *en avant* de cette position, dans le sens du mouvement, d'autant plus en avant que le débit est plus grand.

Ce léger *décalage des balais*, d'autant plus grand que

(1) Pas plus ici qu'ailleurs il n'y a de règle sans exceptions et, par exemple, dans certaines dynamos de la *Société alsacienne*, les balais frottent directement sur l'induit.

l'anneau débite plus, est dû à ce que le courant créé dans l'induit produit lui aussi un champ magnétique, lequel réagit sur le champ inducteur et en change la disposition d'autant plus qu'il est plus intense.

C'est là ce qui constitue la *réaction de l'induit*. En pratique, il faut *caler* les balais dans la position où ils *crachent* le moins, où les étincelles produites sous ceux-ci sont le plus faibles possible.

Quant à ces étincelles, elles sont provoquées par le fait que chaque fois que deux lames successives du collecteur passent sous un balai, les spires correspondantes de l'anneau quittent une moitié de celui-ci où le débit est d'un certain sens pour

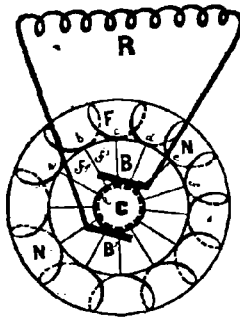


Fig. 465. — Principe du collecteur.

entrer dans une autre où il est de sens inverse. Le courant doit donc s'inverser brusquement dans ces spires et comme elles opposent à ce changement brusque une grande résistance en vertu d'une sorte d'*inertie magnétique* que nous étudierons plus loin sous le nom de self-induction, le circuit préfère se fermer à travers un autre chemin moins résistant, qui est l'espace d'air compris entre le balai et la lame du collecteur qu'il vient de quitter.

D'où la production d'une étincelle qui se renouvelle au passage de chaque lame, détériore collecteur et balais, vit aux dépens de l'énergie motrice et enfin — quel réquisitoire ! — empêche de tirer d'une dynamo toute la puissance possible.

De savantes études ont permis, heureusement, de réduire à fort peu de chose ce feu d'artifice de mauvais goût, et les balais des machines actuelles — plus dociles aux suggestions.

du Comité consultatif d'hygiène que nombre de Parisiens — ne crachent presque plus.

PRODUCTION DU CHAMP INDUCTEUR

Comment fabriquer le champ magnétique dans lequel se déplace l'induit ?

La première idée qui vient à l'esprit, c'est d'employer comme inducteur un puissant aimant permanent. On a ainsi une machine *magnéto*-électrique. Le champ, alors, ne coûte rien. C'est ainsi que procédèrent les premiers inventeurs.

Aujourd'hui, les machines magnéto font le plus bel ornement de nos musées d'antiquités; dans toutes les machines modernes — sauf minuscules exceptions — le champ inducteur est obtenu par l'excitation d'*électro-aimants* appropriés. Singulier progrès, pensez-vous, d'aller chercher dans une *excitation* coûteuse un champ magnétique qui pourrait être gratuit !

Progrès énorme, cependant, car le fer est beaucoup plus *perméable* aux lignes de force que l'acier et on peut, à son aide, diminuer énormément la résistance magnétique. Il est dès lors facile d'obtenir une aimantation à laquelle l'aimant permanent ne permettrait pas d'arriver. Il est bien vrai qu'on est forcé d'*exciter* l'inducteur et que le champ n'est plus gratuit comme lorsqu'il est produit par un aimant, mais on préfère de beaucoup consentir à ce sacrifice en somme assez faible et largement racheté.

Quant aux moyens de réaliser cette excitation, il y a différentes manières de procéder.

On peut tout d'abord exciter les inducteurs à l'aide d'une source auxiliaire, par exemple, d'une pile. C'est l'excitation dite *séparée*. On ne procédait pas autrement avec les premières machines dynamos (fig. 104). Mais c'est bien ennuyeux, cette source extérieure, c'est bien de la complication pour pas grand chose, puisque dans l'excitation nous dépensons peut-être bien 10 watts, alors que l'induit nous fournit 100, 200, 500 watts.

N'y aurait-il donc pas moyen de se servir d'une partie de ces 100, de ces 200, de ces 500 watts, de leur emprunter les 10 watts nécessaires pour réaliser l'excitation et remiser avec toutes sortes d'égards notre source auxiliaire devenue superflue?

Mais l'embarassant, c'est de se mettre en route!

La réflexion, pourtant était bien naturelle. Deux savants électriciens, Siemens et Wheatstone, se la firent chacun de leur côté, et le résultat de leurs méditations fut de doter l'industrie de deux modes d'*auto-excitation* tout à fait différents.

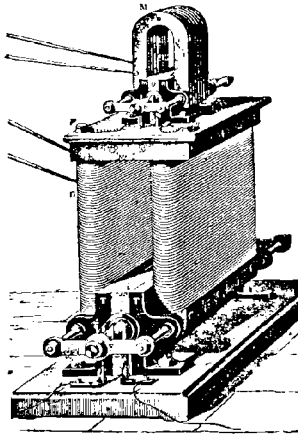


Fig. 106. — Machine à excitation séparée de Wilde.
La petite machine qui se trouve à la partie supérieure est une magnéto qui sert d'excitatrice.

Qu'est-ce que l'auto-excitation?

C'est l'application industrielle fort inattendue d'un phénomène bien mince dont nous avons déjà parlé à propos de l'hystérésis, le *magnétisme rémanent* : quand un morceau de fer même très pur a été soumis une seule fois dans son... existence à l'aimantation, il en conserve toujours quelque chose, c'est-à-dire une aimantation résiduelle qui constitue le magnétisme rémanent.

Imaginons un anneau comme celui que nous avons décrit tournant entre les deux pièces polaires d'un électro, et sup-

posons que les balais communiquent avec les deux extrémités de l'enroulement de cet électro.

En vertu du magnétisme rémanent de ce dernier, un très faible champ magnétique existe, dont les lignes de force traversent l'anneau en mouvement et suffisent pour créer une faible f. é. m. Si faible qu'elle soit, cette f. é. m. n'en provoque pas moins un certain courant qui vient circuler dans l'enroulement de l'inducteur et *augmente l'aimantation*.

Le champ augmentant, la f. é. m. développée par l'anneau augmente aussi, envoie un courant plus fort qui provoque une aimantation encore plus forte, et ainsi de suite. Si on approche en effet un morceau de fer des pôles de l'électro, il est facile de constater *pendant plusieurs secondes* une augmentation constante de l'attraction. Finalement, la f. é. m. atteint un certain état d'équilibre qui dépend des conditions de construction de l'induit et de l'inducteur, de l'excitation, de la vitesse, etc., et aussi de l'état de *saturation* plus ou moins grande du fer.

Tel est le secret de l'auto-excitation des machines.

MODES D'EXCITATION DES DYNAMOS

Il est vrai que cela n'est pas suffisant. Nous ne serions guère avancés en effet si nous ne pouvions réaliser en pratique que le dispositif qui vient d'être indiqué, si, en d'autres termes, la force électromotrice créée par cette auto-excitation n'avait d'autre occupation que d'entretenir elle-même sa précieuse existence.

Rien n'empêche, fort heureusement, de l'employer *en même temps* pour produire des effets électriques utiles dans un circuit extérieur.

Il y a même deux manières de procéder pour cela. Siemens et Wheatstone, ci-dessus nommés, ont découvert simultanément en 1866 le principe de l'auto-excitation en opérant chacun d'une façon différente.

Siemens (fig. 107) fit circuler *la totalité* du courant produit par l'induit successivement dans l'inducteur, puis dans le circuit extérieur à alimenter. Le fil de l'inducteur est gros et court,

de sorte qu'une faible portion seulement de la f. é. m. produite y est absorbée, tandis que le reste est absorbé dans le circuit extérieur. Le raisonnement que nous avons fait tout à l'heure pour expliquer l'amorçage de la dynamo s'applique ici textuellement.

Wheatstone, au contraire, ne prit qu'une *petite partie* du courant total pour l'envoyer dans les inducteurs. L'enroulement des inducteurs est donc placé *en dérivation* sur les balais de la machine, ceux-ci alimentant en outre le circuit extérieur. L'amorçage se produit encore de la même façon que nous avons indiquée. Ici, l'enroulement de l'inducteur est

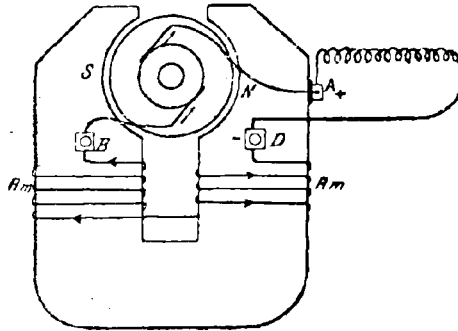


Fig. 107. — Excitation en série.

beaucoup plus long et plus fin que dans l'autre cas, de sorte que les ampères-tours nécessaires à l'aimantation (voir p. 105) au lieu d'être produits par beaucoup d'ampères et peu de tours, le sont par beaucoup de tours et peu d'ampères.

Pour rappeler leur mode d'excitation, les dynamos système Siemens sont appelées dynamos *en série* et les autres, dynamos *en dérivation* ou dynamos *shunt*.

Ces deux groupes de machines présentent dans leur fonctionnement des différences essentielles qui leur valent de convenir chacune à certaines applications : ces différences se manifestent dès leur mise en marche :

Faisons tourner une dynamo série en laissant ouvert le circuit extérieur, c'est-à-dire *à vide* : aucun courant ne circule dans les inducteurs, la dynamo ne peut s'amorcer.

Au contraire, une dynamo shunt s'amorce très bien *à vide*

parce que le circuit des inducteurs, lui, est toujours fermé sur les balais. Il peut donc s'y produire cette succession d'effets croissants qui constitue l'amorçage.

En cours de fonctionnement également, les deux sortes de machines se comportent très différemment :

Plus une machine série débite, plus l'aimantation devient énergique, puisque tout le courant passe à travers l'inducteur (1). Donc, plus la f. é. m. devient grande. Si on diminue par trop la résistance extérieure, en alimentant, par exemple, des lampes en dérivation trop nombreuses, l'induit pourra être brûlé par le courant trop énergique qui y circule.

Avec une dynamo shunt, au contraire, pareil fait ne

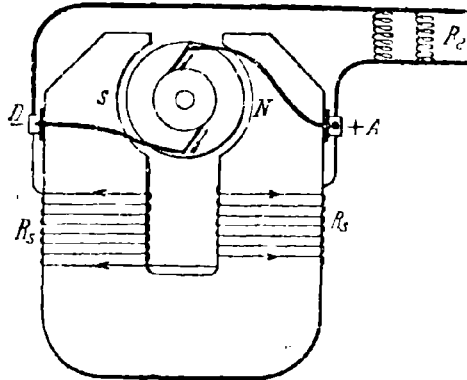


Fig. 108. — Excitation en shunt ou en dérivation.

pourra jamais se produire : supposons qu'on augmente le débit demandé à la machine : la perte de potentiel dans l'induit augmente, donc le courant qui circule dans l'électro, dont la valeur est affectée par cette perte, décroît aussi, ce qui est une cause de désaimantation et par conséquent, de diminution de la f. é. m. et de nouvelle diminution de diff. de pot. aux bornes. Ainsi, quand on *augmente* le débit demandé à une machine shunt, la f. é. m. *diminue*, contrairement à ce qui se passe dans une machine série. Si donc on met une dynamo shunt en *court-circuit*, ce fait, qui ferait griller infailliblement l'induit d'une machine série, n'a ici d'autre conséquence

(1) Toutefois, lorsque l'excitation devient très grande, l'aimantation du fer tend vers une limite qu'on appelle la *saturation magnétique*.

que de faire tomber à zéro la diff. de pot. aux bornes, et de désamorcer la machine.

L'un des emplois les plus importants des machines shunt consiste dans l'alimentation des circuits d'éclairage. Or, nous venons de voir que ce genre de dynamos se comporte comme des piles en ce sens que quand le débit augmente, la diff. de pot. aux bornes baisse par suite de la résistance intérieure, qui est ici la résistance de l'induit. A la vérité, la résistance intérieure des grandes dynamos employées sur les circuits d'éclairage est très faible, mais d'autre part, les débits qu'on

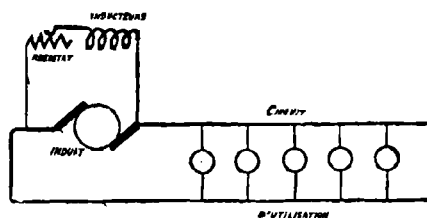


Fig. 109. — Régulation de la diff. de pot. aux bornes par un rhéostat d'excitation.

leur demande sont énormes, de sorte que les variations de tension, quoique moins accentuées que dans le cas de l'éclairage par pile, seraient encore trop grandes pour être acceptables sur un réseau d'éclairage. Heureusement, cet inconvénient est diminué en introduisant dans le circuit des électros une résistance additionnelle dite *rhéostat d'excitation* (fig. 109) réglable à volonté. Quand le débit est faible, la diff. de pot. aux bornes de la dynamo a des tendances à être trop élevée : on laisse alors dans le circuit d'excitation toute la résistance du rhéostat. A mesure que les abonnés allument, que la demande du courant augmente, la diff. de pot. aux bornes tend à diminuer : on retire alors progressivement de la résistance en déplaçant une manette sur des touches successives entre lesquelles la résistance additionnelle est intercalée par fractions. On augmente de cette façon le courant d'aimantation et on peut arriver à maintenir la différence de potentiel suffisamment constante.

Signalons encore les machines *compound* dans lesquelles

la combinaison des propriétés de l'enroulement en série (f. é. m. croissante avec le débit) et de l'enroulement en dérivation (f. é. m. décroissante avec le débit) est mise à profit pour maintenir *automatiquement* une diff. de pot. constante aux

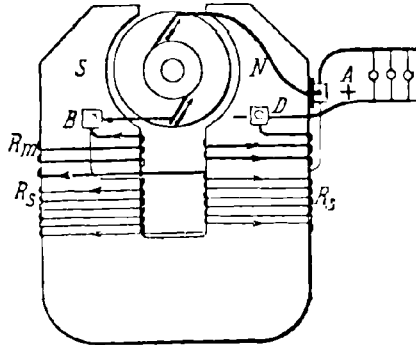


Fig. 110. — Excitation compound.

bornes *quel que soit le débit*. Ces machines sont employées quand les variations de débit sont trop brusques pour pouvoir être suivies aisément, comme c'est le cas, par exemple, pour les machines génératrices employées dans les usines de traction électrique.

CHAPITRE QUINZIÈME

EXAMEN DE QUELQUES TYPES DE MACHINES

A COURANT CONTINU

Les dynamos que l'on rencontre dans l'industrie sont très variables d'aspect. Mais — doit-on le dire ? — cette séduisante variété n'a pas eu de causes plus profondes que la nécessité où les constructeurs désireux de faire passer leur nom à la postérité ont été de faire preuve d'imagination pour ne pas se copier trop manifestement les uns les autres. Indéfiniment calqués sur quelques types caractéristiques, les différents modèles sont identiques quant aux principes, et les différences de fonctionnement sont bien légères : la plupart des dynamos industrielles actuelles sont d'excellents outils transformant en énergie électrique utile jusqu'à 96 0/0 de l'énergie mécanique qu'on leur offre. Aussi bornerons-nous notre rapide examen à l'étude des principaux de ces différents types.

Machine magnéto de Gramme. — La figure 111 montre — à titre historique — une machine *magnéto* de Gramme, type de laboratoire. Un anneau Gramme y tourne entre deux pôles d'un puissant aimant feuilleté Jamin. Vous vous apercevez aisément qu'aux temps reculés, où l'on construisait ces machines, les principes du circuit magnétique dormaient encore en paix dans la cervelle de leurs futurs inventeurs. Les pauvres lignes de force devaient bien s'essouffler à parcourir le chemin étroit et long à plaisir qu'on leur avait réservé !

Utilisation de l'énergie humaine. — Comme on le voit, cette magnéto était destinée à être mue par le pied de l'expérimentateur et à transformer en énergie électrique l'énergie *humaine*.

A ce propos, disons incidemment quelques mots d'appareils plus modernes et mieux combinés destinés au même but. En ce temps de cyclisme, la question peut avoir son intérêt.

Ce n'est pas en effet une énergie négligeable, tant s'en faut, que le cycliste dépense sur son cheval — même sans chercher à battre des records —. La puissance développée peut quelquefois atteindre et dépasser 10 kilogrammètres par seconde : or, 10 kilogrammètres par seconde, cela fait 100 watts, et une batterie de pile de 100 watts a déjà l'air d'un outil qui veut devenir quelque chose. Si ces 100 watts étaient transformés en puissance électrique par une petite dynamo ayant 70 0/0 de rendement, chacun de nous pourrait produire dans sa journée 2/3 de kilowatt-heure. Il n'y a pas à rire, c'est là de l'énergie

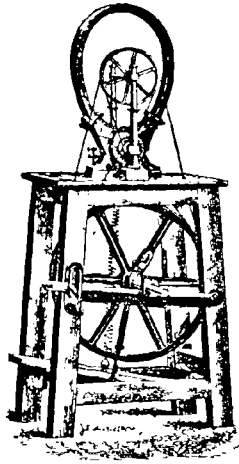


Fig. 111. — Machine magnéto de Gramme.

pas beaucoup plus coûteuse que celle de la pile... surtout si l'on fréquente les restaurants à 1 fr. 10.

Aussi un constructeur a-t-il eu l'idée de mettre à la disposition des fanatiques du cyclisme, désœuvrés par le mauvais temps, un outil qui leur permette d'utiliser leur bicyclette pour mouder, à défaut de kilomètres... des volts et des ampères. Une petite dynamo est tout simplement mise en mouvement à l'aide de la roue motrice du vélo, légèrement soulevée de terre. On peut charger, à l'aide du courant fourni, une batterie d'accumulateurs, et si la maison compte quelques fanatiques de la bête d'acier, on peut l'inonder de flots de lumière.

Un autre moyen pour l'amateur de se procurer la force motrice nécessaire consiste à la demander au vent, car en dépit du bon La Fontaine, il y a dans le vent autre chose que... du vent, et on construit

maintenant des « turbines atmosphériques » qui permettent d'utiliser très efficacement l'énergie qu'il renferme. Seulement, quelque perfectionné que soit le système, il n'empêche pas le vent d'être plus capricieux et la nécessité s'impose de compléter l'installation par des accumulateurs, qui recevront le trop plein de l'énergie les jours d'abondance pour le restituer dans les périodes de disette. Mais à ce compte, mieux vaut se procurer un de ces jolis petits moteurs à gaz ou à pétrole que l'industrie établit maintenant à bon compte.

On sera ainsi plus sûr du lendemain.

Machine Gramme, type supérieur. — La machine que repré-

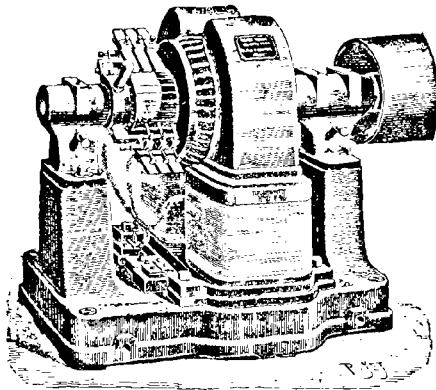


Fig. 112. — Machine Gramme, type supérieur.

sente la figure 112 est une application plus sérieuse de l'anneau Gramme à la production de l'énergie électrique.

C'est une machine remarquable par la sobriété et l'élégance de ses formes.

L'induit est à la partie supérieure de l'ensemble, d'où le nom de *type supérieur* Gramme donné à ce modèle par opposition au *type inférieur* du même constructeur. Le nom ne fait donc rien à la qualité, comme on pourrait le croire.

On voit que l'excitation est obtenue à l'aide d'un électro en forme de fer à cheval, c'est-à-dire que c'est à une *dynamo* que nous avons affaire ici.

On voit aussi que le circuit magnétique a été ramené à des proportions plus logiques que dans la *magnéto* précédemment décrite :

l'inducteur est très ramassé, laissant tout juste la place nécessaire pour l'enroulement des bobines excitatrices.

Dynamos à pôles conséquents de Bréguet. — Au lieu de l'inducteur en fer à cheval, on préfère souvent un modèle d'inducteur dont la machine Bréguet (fig. 113) est une application. Dans ce modèle, il n'y a toujours que deux pôles, bien qu'il y ait à proprement parler deux circuits magnétiques différents. Les deux parties de l'inducteur sont montées l'une par rapport à l'autre en

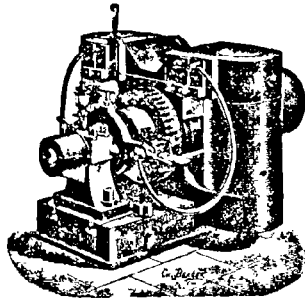


Fig. 113. — Machine Bréguet à pôles conséquents.

opposition, comme deux piles en quantité, et ils envoient chacun leur flux dans l'induit.

MACHINES MULTIPOLAIRES

Dans les grandes machines comme celles qui sont maintenant employées dans l'industrie, il est difficile de donner à l'induit une très grande vitesse angulaire par suite de l'énorme force centrifuge qui serait développée. On a donc dû chercher des artifices pour réduire le plus possible cette vitesse.

Le principal de ces artifices consiste à employer, au lieu de deux pôles magnétiques diamétralement opposés (fig. 102), plusieurs paires de pôles disposés tout autour de l'induit. Le flux magnétique circule alors dans celui-ci comme l'indique la figure 114, relative à 4 pôles, et il résulte de cette disposition que la f. é. m. de chaque spire de l'anneau s'inverse 4 fois au lieu de 2 à chaque révolution (voir page 174) : On produit ainsi, à égalité de vitesse et d'intensité de champ, une f. é. m. 2 fois plus grande. Ou, ce qui revient au même, on peut faire tourner 2 fois moins vite et avoir la même f. é. m. De

même, avec une machine à 6 pôles, à 8 pôles, on peut tourner 3, 4 fois moins vite.

Il faut autant de paires de balais que de paires de pôles.

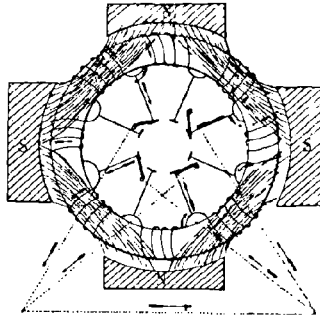


Fig. 144. — Répartition du flux dans une machine à 4 pôles

La figure 145 montre comment on a tiré parti de ces considérations dans la machine à 6 pôles de Gramme, et la figure 146 représente une des machines à 12 pôles couramment employées par la Compagnie Thomson-Houston dans ses grandes usines de traction électrique.

Pour permettre au lecteur d'apprécier combien il a coulé d'eau

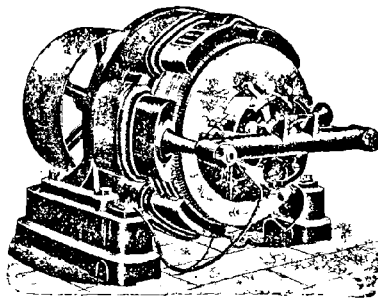


Fig. 145. — Machine multipolaire Gramme

sous les ponts depuis la pile de Volta, disons que cette dernière machine est quelque chose comme *un joujou* à côté des gigantesques dynamos que mettent en branle les eaux du Niagara!

Il ne nous reste plus, pour terminer cette rapide revue, qu'à parler des machines à induit *en tambour*.

INDUITS EN TAMBOUR

A côté des enroulements en hélice ou en *anneau*, en effet, disons qu'on utilise très souvent un mode d'enroulement très différent de celui-là en apparence, l'enroulement en *tambour*, dont la figure 117 représente l'aspect.

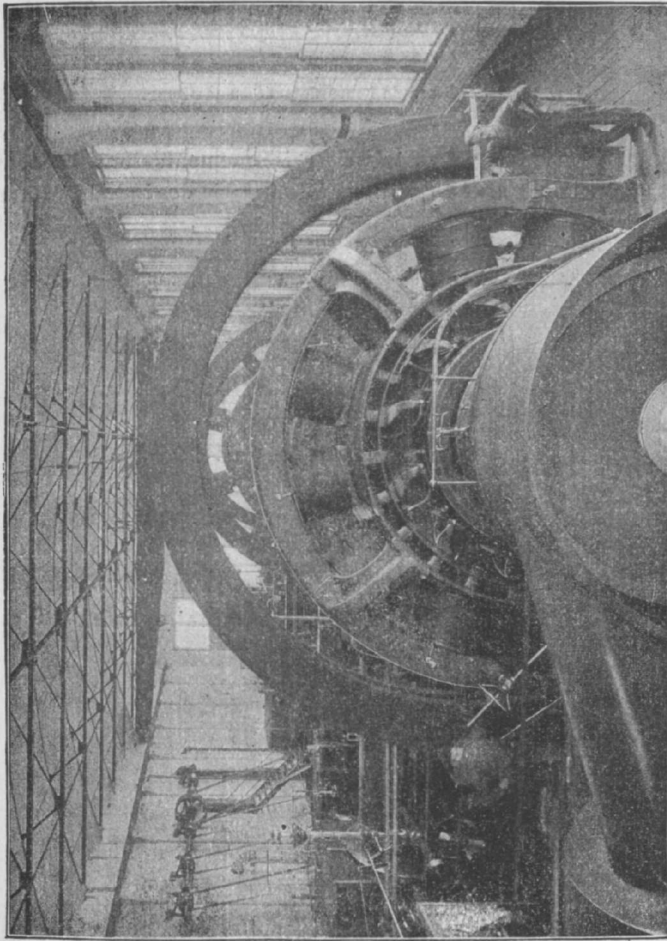


Fig. 116. — Dynamo à douze pôles de la Compagnie Thomson-Houston.

La différence extérieure est grande entre ces deux enroulements : mais la seule réelle qui existe entre eux ressort nettement de la comparaison entre les figures 100 et 118. Dans la figure 100, on voit une spire tourner autour d'un axe XX, qui lui est extérieur : c'est le type

des [spires des inducts en anneau. Dans la figure 118, au contraire la spire tourne autour d'un de ses diamètres : c'est la caractéristique

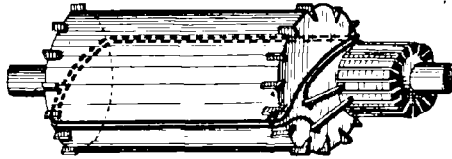


Fig. 117. — Schéma de l'enroulement en tambour.

des inducts en tambour. Les mêmes raisonnements dont l'anneau Gramme a été l'objet sont applicables à la théorie des inducts en tam-

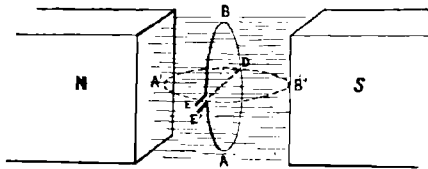


Fig. 118. — Principe de l'enroulement en tambour.

bour et nous amèneraient à des conclusions identiques; aussi nous garderons-nous de les recommencer.

Il ne faudrait pas croire, malgré cela, que ces machines sont peu employées dans l'industrie. Peut-être, au contraire, existe-t-il de

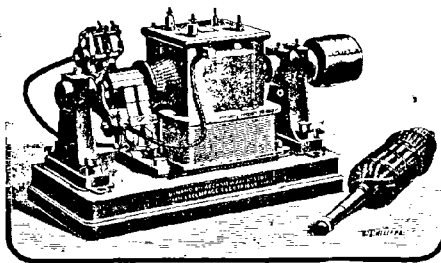


Fig. 119. — Machino Rechniewski.

plus nombreux représentants du tambour que de l'anneau. La cause en tient à diverses raisons dont la plus facile à saisir est que le fil de

l'enroulement en tambour est tout entier *extérieur* au cylindre de fer qui sert de support, ce qui n'est pas le cas pour l'anneau : l'enroulement est donc industriellement plus facile à réaliser.

La machine Rechniewski (fig. 119) représente un type d'application du mode d'enroulement en tambour. Elle présente, d'ailleurs, une particularité très intéressante. L'induit est *denté*, le fil est logé dans le creux des dents. Par conséquent, il n'existe pas entre le fer de l'inducteur et le fer de l'induit la couche de fil non conductrice — magnétiquement parlant — qui y est généralement interposée. C'est un nouveau gain réalisé sur la résistance magnétique, et ce gain se traduit par ce fait que ces machines sont plus légères que les autres à puissance égale.

CHAPITRE SEIZIÈME

MOTEURS A COURANT CONTINU

L'imcomparable faculté de transformation qui caractérise l'énergie électrique va nous permettre maintenant d'aborder un ordre d'applications bien différentes de celles que nous avons rencontrées jusqu'ici, les applications mécaniques de l'électricité.

De même en effet que les actions chimiques et électriques sont réversibles (voir p. 116), de même les formes électrique et mécanique de l'énergie peuvent se transformer de l'une à l'autre avec la plus extrême facilité.

Des exemples de cette réversibilité vous sont déjà familiers. Ainsi, vous savez que si un aimant se déplaçant dans une bobine y produit un courant (expérience de Faraday, point de départ des dynamos), réciproquement, un courant circulant dans cette bobine détermine l'attraction de son armature, produisant par suite *un effet mécanique*. Ces faits connus, il ne nous reste plus qu'à chercher le moyen de réaliser cette transformation dans les meilleures conditions possibles.

Il y a très longtemps déjà qu'on s'est aperçu de tous les avantages qu'une telle transformation pourrait présenter dans bien des cas, et ce n'est pas d'hier que le problème des *moteurs électriques* est posé.

On a cru tout d'abord en trouver la solution dans un simple perfectionnement de l'électro-aimant.

C'est ainsi que Froment construisit un moteur consistant en un puissant électro-aimant attirant *successivement*, grâce à des émissions de courant savamment combinées, des palettes de fer disposées à la périphérie d'une roue qui prenait un mouvement de rotation extrêmement rapide.

C'était très imposant à voir tourner.

Mais s'avisait-on de gêner avec les doigts le déplacement des palettes, il n'en fallait pas plus pour calmer cette belle ardeur et tout réduire à l'immobilité.

Comme le moteur Froment resta pendant longtemps l'idéal du genre, on conçoit que pendant bien des années on ait considéré le problème des moteurs électriques comme fort difficile à résoudre ; mais on alla plus loin et on ne se gêna pas pour répéter sur tous les tons que le moteur électrique ne serait *jamais pratique* ! Le fait n'est pas malaisé à vérifier : cette affirmation téméraire est écrite en toutes lettres sur des traités datant d'une vingtaine d'années.

Or, les prophètes d'occasion qui affirmaient ceci avaient le nez si creux que lorsque les dynamos à courant continu vinrent donner le moyen de produire économiquement l'électricité, l'une des premières propriétés qu'on leur découvrit fut que précisément elles constituaient en même temps des moteurs admirables : Leur fournissait-on de l'énergie mécanique en les faisant tourner, elles produisaient du courant électrique ; leur donnait-on au contraire du courant, elles se mettaient à tourner avec rapidité en restituant sous forme de travail mécanique l'énergie électrique fournie. Ceci aussi bien que cela d'ailleurs avec un rendement extraordinairement élevé. Aussi les moteurs électriques, dont l'usage se développe si rapidement en ce moment dans toutes les branches de l'industrie, ne sont-ils que de simples dynamos auxquelles on apporte sous forme de courant électrique l'énergie qui doit les mettre en branle.

Avant d'entrer dans le détail du fonctionnement de ces moteurs, essayons de nous faire de ce fonctionnement une idée approchée.

Lorsqu'un courant circule à travers une bobine de fil conducteur, nous savons qu'il se produit à l'intérieur de cette bobine un champ magnétique dont les lignes de force sont dirigées suivant l'axe de cette bobine, leur sens étant donné par l'application de la règle du tire-bouchon de Maxwell (voir page 156).

Suspendons cette bobine C dans un autre champ magnétique produit par un électro E (figure 120), puis faisons-y

passer le courant. Nous la voyons dévier avec une énergie extrême : après quelques oscillations saccadées, elle prend une position telle que ses propres lignes de force prennent la direction des lignes de force du champ inducteur, de même qu'un fétu de paille flottant sur un ruisseau et fixé par une de ses extrémités prendrait la direction du courant d'eau.

Ainsi, l'expérience nous montre que lorsqu'un champ est produit à l'intérieur d'un autre et obliquement par rapport à cet autre, les lignes de force des deux champs tendent énergiquement à prendre la même direction, de sorte que si l'un des

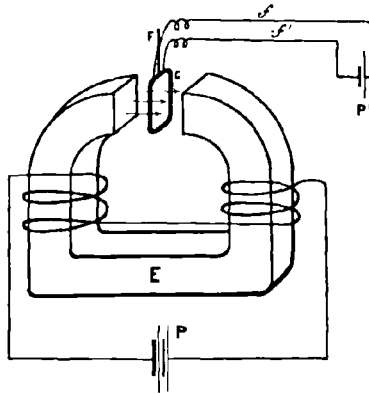


Fig. 120 — Orientation dans un champ d'une bobine parcourue par un courant

systèmes inducteurs est mobile, il est fortement sollicité à se déplacer et à amener son champ dans la direction de l'autre.

Mais il ne suffit pas que les deux champs soient amenés à la même direction. Il faut encore que leurs lignes de force soient dirigées dans le même sens :

Supposons qu'au moment où le champ de notre bobine C arrive en coïncidence avec le champ inducteur nous changions le sens du courant dans C : les lignes de force de son champ changeront également de sens ; ceci revient à tourner notre fétu de paille de tout à l'heure, l'extrémité libre vers l'amont du ruisseau : on voit donc que C doit faire un *demi-tour* pour se trouver de nouveau en équilibre ; si à ce moment nous changeons encore le sens du courant et ainsi de suite, nous

obtiendrons un mouvement de rotation continu de la bobine, qui, éternelle juive-errante, sera toujours en route vers une position d'équilibre qu'elle n'atteindra jamais.

En pratique, pour faire un moteur électrique, on n'opère pas autrement. Seulement, au lieu d'une bobine unique que produirait des efforts trop variables pendant sa rotation, on dispose de toutes les spires enroulées sur l'induit d'une dynamo qui constituent en somme autant de bobines différentes solidaires du même axe. Chacune de ces spires est placée dans le champ magnétique produit par les inducteurs, et comme elle est elle-même traversée par le courant qu'apportent les balais, elle tend à se déplacer vers la région où son propre champ se superposera exactement à celui de l'inducteur.

Voyons les choses d'un peu plus près.

Considérons comme en page 173 une spire isolée d'un anneau Gramme tournant dans un champ magnétique (fig. 121).

Nous savons que si nous *forçons* cette spire à tourner dans un certain sens, de 1 vers 2 et 3 par exemple, elle va *produire* un courant *toujours de même sens* dans toute cette moitié de tour.

L'effort qu'il faut exercer pour la faire tourner est destiné à vaincre la réaction du courant sur le champ, car nous avons vu (loi de Lenz, page 175) que le champ produit par ce courant *s'oppose* à la variation du champ inducteur. Eh bien! imaginez que nous cessions d'exercer cet effort, et ceci assez subitement pour que le courant qui circule dans la spire n'ait pas le temps de disparaître (1). Alors, évidemment, l'action du courant sur le champ n'étant plus neutralisée par l'effort, réagira violemment sur la spire pour tendre à la ramener *en arrière* en lui faisant produire de la force motrice. Or, ce même résultat, nous pouvons l'obtenir d'une façon bien plus simple et aussi prolongée que nous désirons en alimentant la spire, à l'aide d'une source extérieure, avec un courant précisément *égal et de même sens* que celui qu'elle produisait tout à l'heure, et en la laissant libre de se mouvoir. L'effort qu'on exerçait tout à l'heure pour *produire* le courant

(1) Effectivement, ce courant ne disparaît que lentement, grâce à la *self-induction* de la spire (Voir chapitre dix-huitième).

n'existant plus, la réaction du courant subsistant seule, la spire sera dès lors sollicitée à tourner en *sens inverse* de son mouvement comme *génératrice*, c'est-à-dire de 3 vers 2 et 1, et à produire de la *force motrice*.

Ce raisonnement est applicable quelle que soit la position de la spire dans la moitié de gauche de l'anneau, puisque nous venons de rappeler que le sens du courant produit par la spire fonctionnant comme génératrice restait constant dans toute cette région.

Donc, à la seule condition d'alimenter la spire entre B et A par du courant toujours de ce même sens, elle tendra cons-

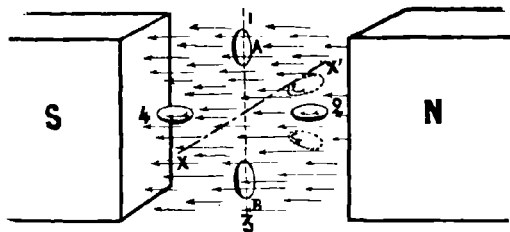


Fig. 121. — Principe des moteurs électriques.

tamment à se diriger de 3 vers 2 et 1. Cette alimentation, si l'on se rappelle que la spire n'est pas isolée mais fait partie d'un enroulement en anneau, il est facile de voir que les balais s'en chargent tout naturellement (1).

La spire arrivant donc en A, que va-t-il maintenant se produire? On peut se le demander, car elle a trouvé là en effet, sa position d'équilibre, ses lignes de force étant maintenant exactement en coïncidence avec celles du champ. Mais en vertu de sa vitesse acquise et surtout de l'action des autres spires de l'anneau, elle passe sous le balai et pénètre dans l'autre moitié de l'anneau. A ce moment, le courant qui la traverse change de sens. Donc le flux de la spire devient opposé au champ inducteur et il faut qu'elle aille trouver sa

(1) A condition d'en changer le sens, puisque sans cela l'induit tournerait à *contre-balais*. De plus les balais d'un moteur doivent être calés *en arrière* du sens du mouvement.

position d'équilibre vers B. où la même chose se reproduira.

En résumé, dans un anneau Gramme alimenté par un courant extérieur, chaque spire, quelle que soit sa position, tend *toujours* à faire tourner l'anneau dans le même sens: ce sens de rotation est d'ailleurs *inverse* de celui qui avec le même champ inducteur produirait le même courant si la machine fonctionnait comme dynamo.

Comme le nombre des spires est très grand, l'effort total est considérable, très régulier, et l'induit prend un mouvement de rotation extrêmement rapide.

On conclura facilement du raisonnement précédent que pour changer le sens de ce mouvement de rotation, il est nécessaire de changer *ou* le sens du champ inducteur, *ou* celui du courant de l'induit. Mais si nous supposons que nous changions le sens du champ inducteur, puis le sens du courant dans l'induit, la seconde opération renversant le résultat fourni par la première, nous revenons finalement au sens de rotation primitif. Donc, changer *à la fois* le sens du champ inducteur et le sens du courant de l'induit *ne change pas* le sens de rotation d'un moteur électrique.

Ainsi donc, si nous relierons une source d'électricité de f. é. m. constante aux balais d'un moteur électrique immobile, ce dernier se met à tourner.

Nous avons plusieurs choses à apprendre dans ce mouvement. Intercalons dans le circuit un ampèremètre: Nous constatons que la déviation de l'aiguille, d'abord très grande, diminue progressivement à mesure que la vitesse s'accélère. Et cependant, nous avons un circuit dont la résistance est bien déterminée. En appelant R cette résistance et E la différence de pot. agissante, nous devrions avoir d'après la loi de Ohm une intensité constante $I = \frac{E}{R}$. En réalité, l'ampèremètre nous indique qu'il n'en est pas ainsi, et si nous y réfléchissons, ceci ne doit pas nous surprendre, puisque nous avons vu (page 121) que la loi de Ohm n'est applicable à un circuit que lorsque toute l'énergie qu'on y envoie s'y dépense en chaleur: Ce n'est évidemment pas le cas ici, puisqu'une partie au moins de cette énergie apparaît en énergie mécanique dans la rotation de l'induit.

Nous sommes, en d'autres termes, en présence d'un effet qui, de même que l'électrolyse d'une combinaison chimique, *coûte* de l'énergie, et doit dès lors se traduire par l'absorption d'une partie de la puissance émise par la source.

Effectivement, l'induit d'un moteur en marche sous diff. de pot. constante développe — comme celui d'une dynamo — une f. é. m. qui augmente avec sa vitesse de rotation, puisqu'un circuit fermé s'y déplace à travers un champ inducteur.

Mais cette f. é. m. est *opposée* à la f. é. m. de la source, c'est-à-dire, suivant une expression que nous avons déjà rencontrée en électrochimie, que c'est une force *contre-électromotrice*. Si donc à un moment donné cette f. c. é. m. est E' , l'intensité du courant n'est que $I = \frac{E-E'}{R}$. Comme la force

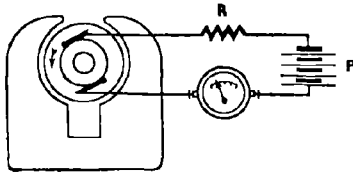


Fig. 122. — Constatation de la f. c. é. m. d'un moteur électrique.

contre-électromotrice de l'anneau, nulle quand le moteur était arrêté, croît à mesure que la vitesse augmente, nous concevons pourquoi notre ampèremètre nous a indiqué un courant graduellement décroissant. Quand l'induit tourne à sa vitesse maxima, il développe une f. c. é. m. E' presque égale à E , de sorte qu'à ce moment le courant d'alimentation est faible.

Nous verrons une application de ce fait à propos du compteur O' Keenan.

Quelle est la puissance fournie au moteur par la source d'alimentation ? C'est évidemment $E I$. Quelle est la puissance dépensée en chaleur dans le circuit de résistance R ? C'est comme nous le savons RI^2 ou $RI \times I$, ou $RI \times \left(\frac{E-E'}{R}\right)$, ou enfin $(E-E')I$. Comme la puissance développée par la source est $E I$, et qu'il ne se dépense en chaleur que $(E-E') I$, ou $E I - E' I$, ce qui n'est pas transformé en chaleur, soit $E' I$, représente évidemment ce qui est transformé dans le moteur en puissance mécanique, c'est-à-dire la puissance *utile*.

Le rapport de la puissance mécanique ou utile $E'I$ à la puissance totale $E I$ soit $\frac{E'I}{E I}$, s'appelle le *rendement* du moteur.

On voit que ce rendement est aussi égal à $\frac{E'}{E}$, c'est-à-dire au rapport de la f. c. é m. à la f. é m. Quand on met le moteur en route, ce rendement commence donc par être fort mauvais, puis, à mesure que la vitesse du moteur augmente, il s'améliore jusqu'à devenir excellent quand le moteur tourne à sa vitesse maxima car à ce moment, E' est presque égal à E . Mais alors, l'intensité est très petite, car elle dépend de $E - E'$, de sorte que la puissance mécanique développée alors est en définitive très faible : ce cas de la rotation à vitesse maxima n'est en effet obtenu que lorsque la machine tourne à vide et la petite puissance mécanique fournie dans de si bonnes conditions de rendement n'est que justement celle qui est nécessaire pour vaincre les frottements.

Cela ne nous avance donc guère que le rendement soit excellent dans ces conditions.

Quant à la puissance développée par le moteur, ou $E'I$, elle est nulle soit quand E' est nul, c'est-à-dire au démarrage. soit quand I est nul, c'est-à-dire quand la vitesse (au moins théorique) est telle que E' est égal à E , car $I = \frac{E - E'}{R}$ se réduit alors en effet à zéro. Entre ces deux limites extrêmes, la puissance affecte une infinité de valeurs que l'on démontre passer par un *maximum* quand E' est égal à $\frac{E}{2}$. Ceci est la *puissance utile maxima* que peut développer le moteur et on remarque que pour ce régime le rendement est égal à

$$\frac{\frac{E}{2}}{E} = \frac{1}{2} \text{ ou } 50 \text{ 0/0.}$$

Un tel rendement est bien mauvais, de sorte qu'en pratique on s'arrange toujours pour que les moteurs travaillent à une vitesse *plus grande* que celle qui correspond à la puissance utile maxima, ce qui augmente E' et améliore le rendement.

On peut remarquer l'analogie de toutes ces formules avec celles qui se rapportent à la puissance et au rendement électriques des piles (page 69).

Une remarque curieuse, pour terminer.

La vitesse de rotation d'un moteur électrique dépend évidemment de l'intensité du champ inducteur. Ceci posé,

comment agirez-vous sur celui-ci si vous avez besoin d'augmenter la vitesse ?

J'affaiblirai ce champ, répondrez-vous, car il faudra que le moteur tourne plus vite pour créer dans ce champ plus faible la même f. c. é. m. voisine de E . Parfait ! plus on affaiblit le champ, plus le moteur tourne vite. Mais je gage que si vous n'aviez pas tourné — vous — votre langue sept fois dans votre bouche avant de répondre, vous auriez répondu... tout juste le contraire (1).

Les considérations précédentes s'appliquent d'une manière générale à tous les moteurs. Mais en somme, nous n'avons considéré jusqu'ici qu'un moteur en quelque sorte théorique dans lequel le champ magnétique serait fourni par une excitation séparée (ou par un aimant permanent, comme c'est le cas dans le compteur O'Keenan). En réalité l'auto-excitation qui est généralement fournie à ces moteurs par l'enroulement inducteur en série ou en dérivation leur confère certaines propriétés extrêmement précieuses et dont il est fort intéressant de se rendre compte.

Moteurs en série.—Examinons d'abord un moteur *série* soumis à une diff. de pot. constante E . Lorsque ce moteur est au repos et que nous y envoyons le courant, la f. c. é. m. est nulle, de sorte que le courant I acquiert une valeur considérable ainsi que la puissance absorbée. La puissance mécanique développée, elle, est nulle puisque $E' = 0$, et en effet une puissance mécanique n'existe que quand il y a mouvement ; mais l'effort exercé sur l'induit n'en est pas moins très grand, de sorte que le *démarrage* s'effectue avec une très grande énergie : Propriété bien précieuse pour les moteurs de tramways en particulier, qui sont obligés de démarrer si souvent avec des charges énormes et sur des rampes très raides.

(1). Il est vrai que ceci ne s'applique bien qu'aux moteurs travaillant à faible charge, car E' étant alors très voisin de E , une très faible diminution du champ — et par suite de E' — entraîne une énorme augmentation de I , donc de la puissance $E' I$ de sorte que le moteur a tout ce qu'il faut pour emballer. Si au contraire le moteur est très chargé, E' diffère beaucoup de E , de sorte que si en affaiblissant le champ on fait diminuer E' , I n'augmente plus aussi vite que tout-à-l'heure : et la puissance ne peut alors s'accroître assez pour permettre au moteur de tourner beaucoup plus vite.

Toutefois le courant du début n'est pas sans présenter quelques inconvénients : il peut affecter pendant les premières secondes des valeurs si élevées que l'induit pourrait en être compromis : aussi est-on obligé d'intercaler dans le circuit pendant cette période, à l'aide d'un *rhéostat de démarrage* (fig. 123), une résistance suffisante qu'on retire progressivement à mesure de la croissance de la f. c. é. m.

Pour une certaine charge du moteur, celui-ci arrive à une certaine vitesse où il y a équilibre à chaque tour (1) entre le travail *dépensé* et le travail *fourni*. Supposons qu'on diminue la charge, c'est-à-dire le travail résistant effectué à chaque tour : le travail moteur que l'induit doit fournir pendant ce tour doit diminuer aussi. Que faut-il pour cela ? Que la vitesse varie, évidemment, puisque c'est de cela que dépend sa puissance ; mais dans quel sens ?

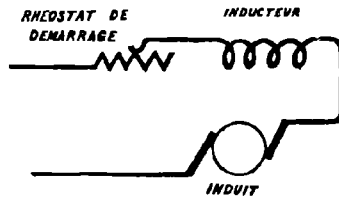


Fig. 123. — Rhéostat de démarrage d'un moteur série

Observons que si dans l'expression de la puissance développée $E'I$, I pouvait être constant, en doublant la vitesse par exemple, on doublerait bien E' et par suite $E'I$, mais le nombre de tours par minute doublant aussi, le travail *par tour* resterait toujours le même. Mais en réalité, dans cette expression $E'I$, le courant I est lui aussi variable, de sorte que le travail fourni dans un tour diminuera si I diminue et inversement. Donc, quand la charge du moteur diminue, et que par suite le travail à fournir à chaque tour doit diminuer, il faut que I diminue, ce qui exige que la f. c. é. m. augmente. Pour cela, il faudrait déjà que la vitesse augmente si le flux inducteur restait constant. Comme par dessus le marché ce flux diminue avec I (puisque nous avons un moteur série), la vitesse du moteur doit augmenter *énormément* pour produire dans ce champ plus faible une f. c. é. m. plus grande (voir page précédente).

(1) En négligeant les effets de l'inertie.

Ainsi, dès que dans un moteur série nous diminuons la charge, la vitesse augmente beaucoup. Si nous le laissons tourner à vide, il s'*emballe* et arrive à une vitesse inquiétante, capable de compromettre sa solidité.

Pour finir cet examen sommaire, remarquons que conformément à une remarque déjà faite (page 205) *on ne change pas* le sens de rotation d'un moteur série en changeant le sens du courant qui l'alimente : car on change à *la fois* le sens du champ inducteur et celui du champ induit.

Pour changer le sens de la rotation, ce qui est indispensable en particulier dans les moteurs de tramways, on doit inverser le sens du courant dans l'induit *seul* ou l'inducteur *seul*.

Moteurs en dérivation. — Passons au moteur *shunt* ou en dérivation.

Quand l'induit est arrêté et qu'on envoie le courant aux bornes du moteur, comme la f. c. é. m. est nulle et la résistance de l'induit très faible, les inducteurs placés en dérivation sur les balais et très résistants relativement, sont presque mis en court-circuit par l'induit, de sorte que tout le courant passe à travers l'induit, presque rien au contraire à travers l'inducteur ; l'excitation est donc très faible et pour peu que le moteur soit légèrement chargé, il ne peut démarrer. Il faut donc, si c'est possible, le faire démarrer à vide et mettre la charge dessus seulement après la mise en marche.

Mais ceci n'est pas toujours possible. Quand ce ne l'est pas — ce qui serait le cas pour les moteurs de tramways — on introduit au moment du démarrage une résistance placée, non plus comme dans le cas du moteur série, sur le circuit d'alimentation, mais dans le circuit particulier de l'induit : De cette façon, la diff. de pot. aux bornes des inducteurs est augmentée, une partie du courant peut s'y dériver et l'excitation se produit. A mesure de l'apparition de la f. c. é. m. aux bornes de l'induit, on enlève progressivement la résistance.

Par contre, les moteurs *shunt* sont bien supérieurs aux moteurs série en ce qui concerne les variations de charge, auxquelles nous avons vu que la vitesse de ceux-ci est très sensible.

Supposons qu'on décharge partiellement un moteur *shunt* en marche, c'est-à-dire qu'on lui demande à chaque tour un

ravail moteur moindre. Comme dans le cas du moteur série nous serons amenés à conclure que ce travail moteur par tour ne dépend que de I . Il ne pourra donc encore diminuer que si I diminue, c'est-à-dire si E' augmente. Donc, ici encore la vitesse augmentera. Mais il suffira qu'elle augmente très peu car les inducteurs restant toujours soumis à la même diff. de pot., le flux ne s'affaiblit plus avec I comme c'était le cas dans le moteur série (1), et l'induit n'a pas besoin de regagner par un supplément de vitesse la valeur nécessaire de E' .

La conséquence, c'est que les variations de charge *n'influent presque pas* sur la vitesse d'un moteur shunt. Un tel moteur, s'il est bien proportionné, doit tourner à une vitesse sensiblement constante, qu'il fonctionne à vide ou qu'au contraire il soit soumis à une charge très élevée. Automatiquement et sans que son allure en soit modifiée, la puissance qu'il demande à la source se proportionne à l'effort qui lui a été demandé.

Propriété bien précieuse, qui appartient en propre au moteur électrique et qui fait que ce moteur en dérivation se plie admirablement aux besoins de l'industrie et aux usages industriels.

En outre, comme le moteur travaille nécessairement toujours très près de sa vitesse maxima, son rendement est en général meilleur que celui d'un moteur série.

A remarquer qu'ici encore le sens de rotation d'un moteur shunt est *indépendant* du sens du courant d'alimentation et que pour le changer, il faut inverser le courant dans l'inducteur ou dans l'induit, ce qui se fait pratiquement en inversant les connexions des fils de l'inducteur avec les balais.

De l'examen précédent, nous pouvons conclure maintenant que pour les applications où l'énergie du démarrage est indispensable avant tout, on donnera la préférence aux moteurs en série, tandis qu'on donnera la préférence aux moteurs shunt pour tous les cas où la régularité de la vitesse, l'impossibilité d'un emballement intempestif et un rendement élevé seront les éléments principaux à rechercher.

(1) Il a même une légère tendance à augmenter, car la diff. de pot. aux bornes se relève avec E' : la vitesse du moteur en varie d'autant moins.

CHAPITRE DIX-SEPTIÈME

APPLICATIONS DES MOTEURS

TRANSMISSION D'ÉNERGIE DANS LES USINES

Les moteurs électriques s'adaptent admirablement à une foule de circonstances; les applications pour lesquelles leur emploi se indiqué sont aussi nombreuses que variées et la mauvaise volonté que les industriels, ignorants de leurs qualités, ont manifesté pendant de longues années à leur égard commence à faire place à de meilleurs sentiments. Grâce à l'expérience acquise, la place du moteur électrique dans l'industrie se fait chaque jour plus large: elle deviendra prépondérante.

- Quels sont les caractères essentiels de cette supériorité du moteur électrique?

Pour répondre à cette question, il faut passer en revue ses divers modes d'application.

Reportez-vous, je vous prie, à une usine, à des ateliers importants d'il y a quelques années. Dans un coin, une machine à vapeur empruntait au charbon l'énergie destinée à porter le mouvement à toutes les parties de l'usine. De cette machine rayonnaient dans toutes les directions des arbres de transmission qui, au moyen de poulies et de courroies, allaient porter à chaque outil une parcelle de cette énergie. Quel enchevêtrement dans tout cela! Quel bruit, quelles pertes aussi dans ce long transport de l'énergie exécuté d'une façon si peu commode! Sur 100 d'énergie fournie par la machine à vapeur, c'était bien joli quand il en arrivait 50 à destination. Ce tableau, d'ailleurs, je suis tout prêt à le reconnaître, est encore d'actualité dans maintes circonstances.

Mais retournez aujourd'hui dans cette usine, en admettant que pour son plus grand profit elle ait su mettre son matériel à la hauteur du progrès.

La machine à vapeur est toujours dans son coin — à moins qu'un moteur à gaz pauvre, plus économique, ne l'y ait remplacée. — Comme jadis, c'est toujours au charbon qu'elle demande l'énergie nécessaire ; mais ce n'est plus dans des arbres de transmission qu'elle déverse le produit de son travail, c'est dans une dynamo génératrice puissante. Plus d'arbres, plus de poulies, plus de courroies ! A la place de toute cette ferraille tapageuse, quelques fils discrets, soigneusement dissimulés — en même temps qu'ils assurent un éclairage bien plus hygiénique et bien plus économique tout en étant plus puissant — arrivent au moteur électrique qui actionne chaque outil. L'ouvrier est absolument maître de son travail, le moteur ne marche que quand le besoin s'en fait sentir, alors que toute une immense transmission, autrefois, devait rester en mouvement pour alimenter le plus souvent quelques rares outils. Et non-seulement l'énergie n'alimente chaque moteur que quand cela est utile, mais le rendement élevé de ce moteur concourt de son côté à une utilisation excellente de l'énergie dépensée.

Aussi n'est-ce pas à moins de 20 à 30 0/0 que l'on estime l'économie réalisée sur la consommation d'énergie par la substitution de la transmission électrique aux vieux procédés mécaniques.

Le prix de l'installation est, de son côté, sensiblement inférieur.

On comprend, dans ces conditions, que non seulement des usines nouvelles, chantiers, ateliers de constructions, fonderies, filatures, etc., s'établissent de tous côtés avec la distribution électrique de l'énergie comme base, mais même que d'autres, établies suivant les vieux errements, n'hésitent pas à jeter bas leurs transmissions démodées et à accorder au moteur électrique la place la plus large.

Mais l'électricité peut encore rendre dans des cas analogues de plus signalés services.

Souvent, une usine comporte plusieurs corps de bâtiments distincts.

On était obligé autrefois de munir chacun d'eux de sa source d'énergie particulière, de sa machine à vapeur spéciale, ce qui se traduisait par une dépense d'installation et une immobilisation de personnel considérables. Avec l'électricité, plus besoin de tout cela : une source d'énergie unique, de rendement excellent par suite de sa grande puissance, faisant tourner une dynamo, est suffisante pour alimenter en énergie et en lumière, par quelques câbles un peu sérieux, les différentes parties de l'usine.

UTILISATION MÉCANIQUE DE L'ÉNERGIE DES RÉSEAUX D'ÉCLAIRAGE

Dans un autre ordre d'idées, il est maintenant peu de grandes villes — et même de petites — qui ne possèdent leur canalisation électrique.

Jusqu'à présent, le rôle principal de cette canalisation s'est borné à fournir aux abonnés leur éclairage électrique. Mais cette application se résume à quelques heures de la journée, en sorte que canalisation et matériel sont fort mal utilisés. (Voir à ce sujet page 197).

Or, pendant le jour, cette canalisation pourrait parfaitement alimenter des moteurs électriques et cette application rendrait à une infinité de consommateurs, comme à la station électrique elle-même, les plus grands services.

Malheureusement, si les grands industriels sont à peu près tous aujourd'hui convaincus des précieux services qu'ils peuvent tirer du moteur électrique, combien de personnes ne se doutent même pas de son existence! A cet égard, l'éducation est tout entière à faire du petit industriel, de celui qui n'a besoin pour sa fabrication que d'une très faible force motrice, et qui préfère l'emprunter à... la machine humaine, cette machine si merveilleuse, mais si détestable au point de vue économique par la cherté du combustible qui l'alimente! Il ne se rend pas compte, ce petit industriel, qu'un homme qui scie du bois, par exemple, développe dans sa journée, s'il ne s'amuse pas, quelque chose comme un cheval-heure, lequel est payé au moins 5 fr., tandis que ce cheval-heure, emprunté à la canalisation d'éclairage par un petit moteur électrique commandant une scie circulaire, eût coûté à peu près 40 centimes et eût abattu la même besogne en une demi-heure!

Et ainsi de toutes les autres applications possibles, depuis le pétrin du boulanger jusqu'au ventilateur, en passant par le tour, la machine à coudre, la soufflerie, etc. etc....

On ne saurait trop répandre chez ces petits industriels la connaissance de ces vérités, dont la mise en pratique leur procurerait un si grand bénéfice. Sans compter qu'une utilisation meilleure des canalisations urbaines aurait comme premier résultat de faire baisser encore le prix déjà assez bas de l'énergie électrique consommée pendant le jour.

On pourrait ajouter à l'appui de tout cela que l'utilisation de l'énergie électrique dans les lampes de préférence à son emploi dans les moteurs est presque un non-sens, car ce qui se consomme dans

ces lampes est susceptible de produire un effet mécanique bien plus frappant que l'éclairage obtenu : Ainsi, une lampe de 16 bougies, que l'on n'hésitera pas à faire fonctionner pendant une soirée de 6 heures, dépensera pendant ce temps une quantité d'énergie susceptible de fournir mécaniquement le travail d'un homme pendant une demi-journée. Et cependant, on se gardera bien d'installer un moteur de puissance équivalente, bien que l'énergie qu'on y dépense *pendant le jour* soit en général payée 2 fois moins cher que celle qui est absorbée le soir dans les lampes.

Pourquoi cette préférence ? Vous me permettrez de ne pas l'expliquer...

TRACTION ÉLECTRIQUE

Le moteur électrique était tout indiqué par ses qualités pour prendre dans la traction des véhicules une place que le cheval, il faut le reconnaître, n'a tenu jusqu'ici que faute de concurrents.

Ce n'est pas lui qu'on peut incriminer, le pauvre malheureux ! il fait bien tout ce qu'il peut et souvent plus qu'il ne peut pour nous contenter !

Enfin, on s'est aperçu que le cheval coûte cher, qu'il ...use fortement à circuit ouvert : on s'est aperçu d'un autre côté qu'il existe certains appareils, certains moteurs série qui, par l'énergie énorme développée aux démarrages, semblaient avoir été créés et mis au monde exprès pour s'adapter aux roues des tramways ou des locomotives (fig. 124).

On fit cette adaptation pour la première fois en... France, naturellement, et les visiteurs de l'exposition d'Électricité de 1881 se rappellent ce véhicule qui prenait sa nourriture en l'air et qui stupéfia tout le monde par l'élégance de ses allures. Mais si en France on entreprend beaucoup de choses, on n'a pas la patience d'en mener beaucoup à bien : si, non sans mal, le tramway électrique s'est implanté chez nous, il a d'abord fallu que tous les autres modes de traction aient disparu devant lui aux Etats-Unis et dans pas mal de villes européennes.

Mais enfin, l'élan est donné. Il est bien acquis que l'emploi de l'énergie électrique, très économiquement produite dans de puissantes usines génératrices, permet de diminuer notablement le prix de la traction ; il est non moins bien reconnu que la substitution de l'électricité à la traction animale se traduit régulièrement par un accroissement de trafic considérable, bien justifié par l'abaissement du prix de transport, l'augmentation de la vitesse, etc. Et

dans ces conditions, même à Paris qui a été comme le dernier bastion de la traction par chevaux, les horribles véhicules qui ont nom *Mademoiselle-Bastille* et autres ne survivront pas au coup que leur a porté l'approche de l'Exposition de 1900.

Nous n'avons pas la prétention d'entrer ici, plus que nous ne l'avons fait pour les autres applications rencontrées jusqu'ici, dans les détails des procédés de traction. Il nous faut pourtant bien dire que le plus souvent, l'énergie électrique fabriquée à l'usine génératrice est amenée à chaque véhicule à l'aide d'un fil aérien où va la chercher un appareil de contact mobile, le *trolley*. C'est ainsi que procède la Compagnie Thomson-Houston sur un ensemble de réseaux

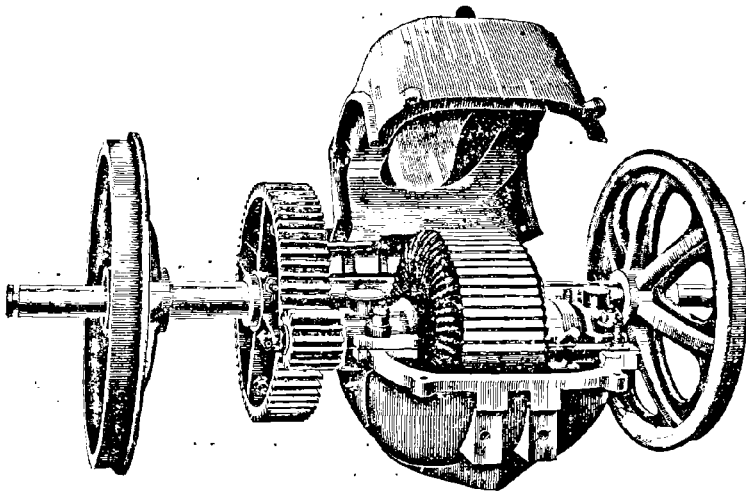


Fig. 124. — Moteur de tramway électrique, type Thomson-Houston

qui représente quelque chose comme la moitié des voies de traction électrique existant sur le globe. Quant à la seconde partie du circuit nécessaire à la circulation du courant, ce sont les rails qui la constituent, d'où l'expression de *retour par la terre*.

Quelquefois, des considérations esthétiques plus ou moins justifiées font rejeter le fil aérien comme étant *trop laid*, suivant un calambour lamentablement usé. On fait alors arriver l'énergie par des câbles établis sous la voie dans des *caniveaux souterrains* nécessairement très coûteux.

Quelquefois encore on préfère supprimer la ligne et mettre directement sur le tramway la quantité d'énergie suffisante pour un voyage, en l'enfermant dans des accumulateurs. Etant donnés les ac-

cumulateurs dont on dispose aujourd'hui, cette séduisante solution, jusqu'à nouvel ordre, est apparemment la moins bonne qu'on puisse choisir.

Sur les chemins de fer, jusqu'à ce jour, la vapeur a tenu bon : c'est évidemment pour l'électricité un adversaire plus redoutable que le cheval d'omnibus. Il ne faut cependant pas désespérer qu'un jour

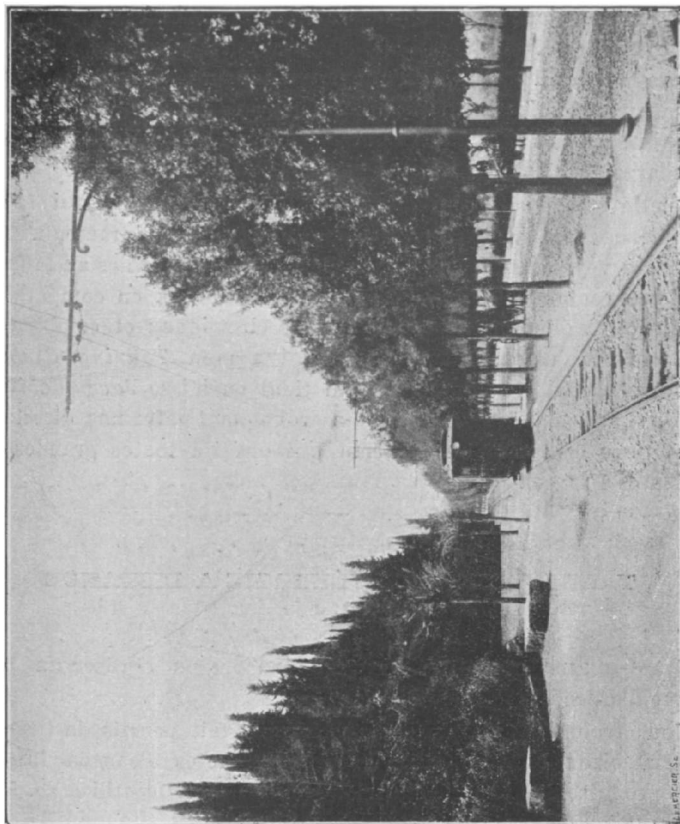


Fig. 125. — Tramway électrique à trolley. Ligne du réseau de Nice (Système Thomson-Houston).

ou l'autre la victoire restera au moteur électrique et que nous pourrons enfin à son aide sortir sensiblement des vitesses de 70 à 80 kilomètres dont nous n'avons pas varié depuis quelques dizaines d'années. Ce résultat désirable paraît possible à réaliser par l'intermédiaire de l'électricité, car la locomotive n'ayant plus à porter avec elle sa lourde provision d'énergie, puisque le conducteur électrique la lui apporterait, pourrait développer une puissance incomparablement plus grande, tout en n'étant plus ébranlée par les formidables

secousses dues au mouvement alternatif du piston. Déjà en France quelques tentatives intéressantes ont été faites dans cet ordre d'idées : prolongement électrique de la ligne d'Orléans dans Paris, etc.

C'est un tout petit commencement.

L'Italie est autrement... dans le train : 3 lignes d'un développement total de 200 km. y sont en cours d'installation.

La traction électrique a encore une autre corde à son arc : c'est l'automobilisme. Evidemment, l'automobile électrique n'est pas encore le rêve : il est affligé d'une grosse infirmité, la batterie d'accumulateurs, qu'il lui faut remorquer à travers les cahots de la route et qui ne peut sans inquiétude perdre de vue la cheminée de l'usine de charge.

Quelle supériorité pourtant sur la voiture à pétrole qui, si elle envoie superbement au nez du passant sa bouffée odorante, réserve pour ses voyageurs des trépidations plutôt désagréables au taux de quelques centaines à la minute ! Combien délicieux en comparaison le silencieux glissement de l'automobile électrique ; et combien on comprend la puissante association qui a nom *Touring Club de France* de vouloir rompre le fil qui tient en laisse l'*accumobile* — tel le hanneton des écoliers — en provoquant entre nos directeurs de stations centrales une entente qui ouvrira toutes grandes les routes de France !

TRANSMISSION DE L'ÉNERGIE A DISTANCE

Grâce aux moteurs électriques, on a encore pu réaliser un problème d'ordre bien différent.

Nous avons déjà vu que l'électrochimie avait permis de tirer un parti précieux de la puissance de certaines chutes d'eau en lui faisant produire de l'énergie électrique immédiatement utilisable. Mais il faut pour cela que ces chutes soient bien situées, de manière que l'alimentation en matières premières et l'expédition des produits fabriqués ne soient pas trop onéreuses.

S'il n'en est pas ainsi — et c'est souvent le cas — si la chute est dans une région à peu près inaccessible, l'énergie qu'elle développe est-elle donc à tout jamais perdue pour l'industrie ? Non, et nous allons voir pourquoi.

D'autre part, une chute peut être très bien placée, avoir tout ce qu'il faut pour séduire un électrochimiste en quête d'un endroit

propice pour y placer ses cuves; mais il existe à quelques lieues de là un centre industriel important dans lequel cette énergie serait accueillie d'enthousiasme si on pouvait l'y transporter, et acquerrait une valeur qu'elle serait bien loin d'avoir au pied de la chute: ce serait donc là une solution préférable.

On est ainsi amené à se demander si l'on ne pourrait pas transporter cette énergie d'une chute en un lieu assez éloigné, mais où elle serait ou mieux appréciée, ou plus aisément utilisable.

Il n'y a évidemment que l'électricité qui puisse donner la solution du problème.

Je n'ai d'ailleurs aucun doute que vous ne sachiez parfaitement comment vous procéderiez, le cas échéant, pour résoudre la question:

Evidemment, vous établiriez une canalisation électrique entre la chute et le lieu d'utilisation, vous transformeriez l'énergie de la chute, par des turbines et des dynamos, en énergie électrique que vous enverriez, par l'intermédiaire de votre ligne, jusqu'aux appareils d'utilisation, moteurs ou lampes, suivant les cas.

Ce n'est pas plus sorcier que cela en effet. Seulement, il y a une petite difficulté. Comme la ligne serait très longue, elle présenterait nécessairement une très grande résistance, car vous n'auriez évidemment pu lui donner une section assez grande — qui serait ruineuse au prix où est le... cuivre — pour compenser son énorme longueur.

Il se perdrait dans votre ligne une partie de l'énergie peut-être très considérable et il pourrait même se faire qu'il n'arrive à peu près rien au bout — ce qui serait de nature à compromettre sérieusement votre prestige d'ingénieur.

Comment s'y prendre pour qu'il n'en soit pas ainsi?

Comment faites-vous, d'abord, pour faire passer beaucoup d'eau à travers un tuyau long et étroit? Vous placez très haut le vase d'alimentation. De même, ici, en employant une *f. é. m. élevée*, nous arriverons à transmettre, par un fil conducteur pas trop gros, une grande puissance sans trop de perte.

C'est pourquoi les transmissions d'énergie à grande distance se font généralement sous une tension de plusieurs milliers de volts. Seulement, cette tension est très dangereuse pour la vie humaine. Sous peine d'*électrocuter* les clients, on ne peut donc pas leur envoyer directement le courant transmis. Il faut commencer, dans la *sous-station* où arrive le courant, par le *transformer* en courant de basse tension. Pour cela, dans le cas du courant continu, on reçoit le courant de haute tension, ou courant *primaire*, dans de puissants moteurs qui commandent directement des dynamos à

basse tension. De celles-ci, le courant produit, ou courant *secondaire*, cette fois inoffensif et prêt à être utilisé, est envoyé à la canalisation qu'il s'agit d'alimenter.

Quand nous parlerons du *courant alternatif*, nous verrons que cette transformation s'effectue bien plus facilement par son emploi, de sorte que c'est généralement à lui qu'on a recours pour les transmissions d'énergie. Il n'empêche que nous devons signaler ici cet ordre d'applications comme un nouvel exemple des services que peut nous rendre le moteur électrique.

Remarquons, pendant que nous y sommes, que cette considération de l'élévation de la diff. de pot. avec la distance à parcourir se retrouve dans toutes les branches de l'industrie électrique. Dans chaque cas particulier, on emploie une diff. de pot. suffisante pour que, tout en donnant à la canalisation une section assez faible, par raison d'économie, on n'y perde pas néanmoins une proportion trop grande de l'énergie qui y circule :

Quand il s'agit de transporter un peu d'énergie à travers un appartement, quelques volts suffisent. Si l'on doit distribuer dans un rayon de quelques centaines de mètres, cas des réseaux de distribution urbains, on porte la diff. de pot. agissante à 100 ou 200 volts. Un réseau de tramways, dont le développement atteint quelques kilomètres, fonctionne en général sous 5 à 600 volts; enfin on canalise l'énergie sous 25.000 volts et plus quand il s'agit, comme en ce moment à Venise, d'amener 11.000 chevaux de 100 kilomètres.

LABOURAGE ÉLECTRIQUE

Le développement extraordinaire acquis par la traction électrique dans le cours de ces dernières années démontre éloquemment combien l'énergie développée par le moteur électrique est moins coûteuse que celle fournie — à grand renfort trop souvent de ces coups de fouet, de ces traitements barbares qui nous soulèvent le cœur — par l'infortuné « moteur à crottin ».

Pourtant, les conditions, ici, ne sont pas aussi favorables qu'elles pourraient l'être dans d'autres circonstances : Si une telle supériorité économique est obtenue dans les villes, où l'énergie électrique doit être en général fabriquée dans des stations centrales coûteuses, aux dépens d'un combustible dont la hausse continuelle commence à devenir inquiétante, que dire des cas où l'énergie peut être produite presque pour rien par l'utilisation de ces chutes puissantes comme il

s'en rencontre tant dans notre beau pays de France? N'est-il pas évident que lorsque ces conditions peuvent être réalisées, pas un cheval, pas un bœuf ne devraient se voir à 20, à 50 kilomètres à la

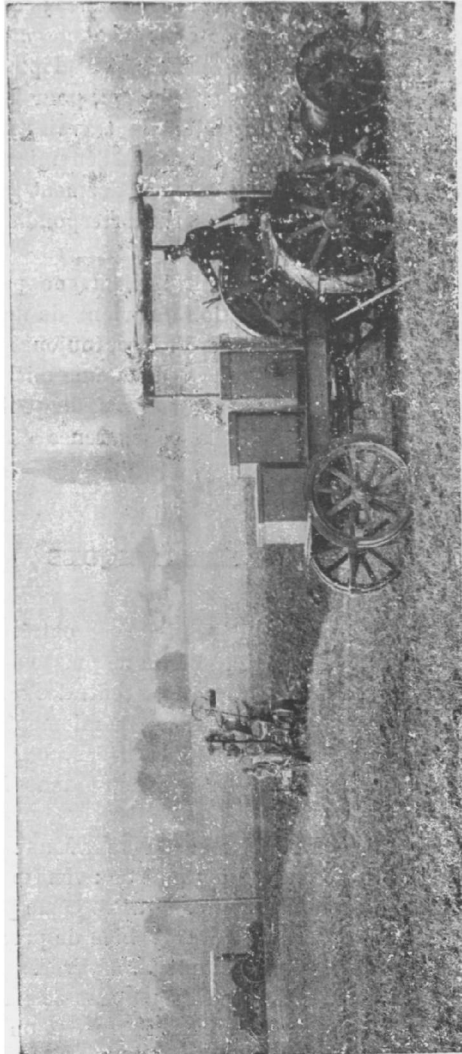


Fig. 426 — Installation de labourage électrique.
Extrait d'une communication faite par M. P. Renaud à la Société d'Encouragement

ronde, puisque *tout ce* qu'ils peuvent faire, nous pouvons le demander au moteur électrique, et dans des conditions économiques infiniment meilleures.

Que ne gagnerait-on, par exemple, dans tous ces cas et même dans d'autres moins favorables, par la substitution du *labourage électrique* à l'antique labourage par bœufs ou par chevaux ?

La question a fait quelques progrès depuis les premiers essais effectués à Sermaize en 1879 par MM. Félix et Chrétien ; elle a été examinée sous toutes ses faces ; elle présente des avantages considérables à tous les points de vue : Le moteur électrique s'adapte dès maintenant d'une manière parfaite à cette application, pour laquelle un matériel spécial a été combiné ; la rapidité du travail est bien plus grande, le labourage plus profond ; enfin, quand l'énergie est produite à l'aide d'une chute d'eau, le prix du défoncement à l'hectare, dans les terres fortes, s'abaisse de 60 fr., prix correspondant aux procédés actuels, à 25 francs !

Laisserons-nous encore sur ce point l'Allemagne prendre une avance dont, en trop de cas, l'Exposition qui vient de finir a fourni la preuve éloquente ? La vieille terre de France, toujours si féconde, mais mal utilisée, ne trouvera-t-elle pas dans une mise en œuvre plus énergique, plus rationnelle de ses ressources, de quoi rebondir de sa déchéance, de quoi lutter contre la concurrence étrangère qui la tue ?

LES COMPTEURS ÉLECTRIQUES

Après bien des tergiversations, l'électricité est entrée dans nos mœurs. Il n'est plus beaucoup de villes où on ne puisse se la procurer à un bon marché relatif grâce aux stations centrales qui la distribuent à domicile, à l'aide d'une canalisation généralement constituée par des câbles souterrains dans les grandes villes, par des câbles aériens en fil de cuivre placés sur des isolateurs dans les centres moins importants.

Après avoir produit l'énergie électrique, nous savons comment, la station centrale doit résoudre un autre problème : vendre cette énergie... le plus cher possible et se la faire payer. Problème primordial, celui-ci, attendu que l'usine se passerait fort bien de produire et de distribuer si ses abonnés voulaient continuer... à payer.

Quand l'énergie ne coûte pas cher, est empruntée par exemple à l'eau d'une chute, on n'y regarde pas de très près et on fait payer à l'abonné, *à forfait*, une certaine somme annuelle par lampe installée ; moyennant quoi l'abonné peut user et abuser de sa lampe, par exemple la laisser brûler pendant 24 heures, quitte, s'il ne craint pas de l'user inutilement, à la mettre sous cloche pen-

dant son sommeil (1) : ceci est rationnel, l'eau de la chute coulant toujours avec la même abondance, que les lampes brûlent ou non.

Mais quand l'énergie est coûteuse — et c'est là malheureusement le cas général — les choses ne se passent pas de même ; il faut mesurer exactement l'énergie fournie à chaque abonné et le faire payer en conséquence. On est alors conduit à placer sur la dérivation de la canalisation principale qui alimente l'abonné un *compteur* — sa bête noire — qui enregistre la quantité d'énergie électrique consommée, exactement comme un compteur à gaz compte la quantité de gaz.

Ceux de nos lecteurs qui sont abonnés de stations centrales et qui ont l'occasion à la fin de chaque mois de faire... la grimace à la présentation de la note à payer, ne seront sans doute pas fâchés de se rendre compte de la façon dont peuvent marcher de semblables appareils.

Il faut dire tout d'abord que les principes sur lesquels on peut établir un compteur sont fort nombreux ; mais les compteurs les plus répandus en pratique (Thomson, O'Keenan, etc.) ont comme caractéristique l'emploi de petits moteurs appropriés : c'est ce qui nous a fait remettre jusqu'ici l'étude de ces appareils.

Compteur O'Keenan. — Nous choisirons à titre d'exemple un type remarquable par sa simplicité, susceptible d'excellents résultats et très peu coûteux — ce qui a son importance pour l'abonné, qui paie en général une location en rapport avec le prix du compteur.

Cet appareil est constitué par un petit moteur, branché en dérivation sur une résistance R intercalée dans le circuit principal de l'abonné, et dont l'axe commande un ensemble de roues dentées correspondant aux différents cadrans enregistreurs : un point, c'est tout.

Voyons le fonctionnement.

Le moteur est *magnéto*, c'est-à-dire que son champ, produit par un aimant permanent A , est *constant*.

Son induit est soumis à chaque instant à la diff. de pot. $R I$ qui existe aux bornes de la résistance auxiliaire R sous l'effet du courant consommé I (2), de sorte que le moteur tourne dès que l'abonné con-

(1) Pour le remarquer en passant, cette « mise sous cloche » nécessite certaines précautions parcequ'elle tend à accumuler la chaleur dégagée par la lampe : ainsi, en enveloppant celle-ci entièrement à l'aide d'un chiffon de drap, on court des risques sérieux pour provoquer un incendie.

(2) La puissance $R I^2$ absorbée par cette résistance étant perdue, on fait

somme. Pendant cette rotation, il effectue un travail nul, ou plutôt le travail négligeable qui correspond au frottement et à l'entraînement des aiguilles du cadran ; en appelant à notre secours les prin-

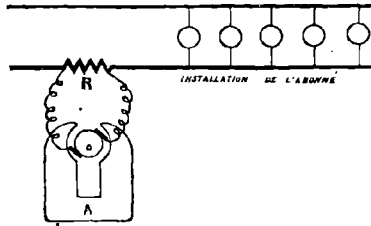


Fig. 127. — Principe du compteur O'Keenan.

cipes rencontrés tout-à-l'heure au cours de l'étude des moteurs électriques nous voyons que dans ces conditions il tourne à une vitesse suffisante pour développer une force contre-électromotrice E'

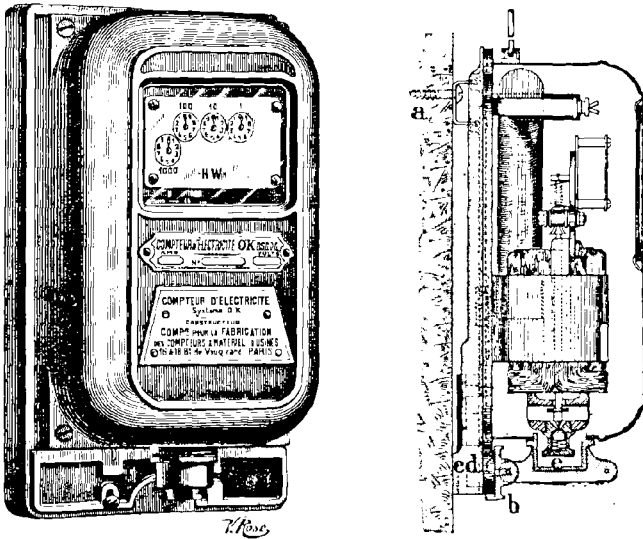


Fig. 128 et 129. — Compteur O'Keenan.

juste égale et opposée à la diff. de pot. RI qui lui est appliquée. Or, le champ inducteur dans lequel il tourne étant constant — nous

R aussi petit que possible et le RI correspondant n'est à pleine charge que de 0,5 volt au plus, ce qui est suffisant pour le moteur du compteur, petite merveille de sensibilité qui démarre avec 0,01 volt !

l'avons vu — cette *f. c. é. m.* varie dans le même rapport que la vitesse, doublant en même temps qu'elle ou inversement. Si donc la diff. de pot. appliquée $R I$ double, c'est-à-dire si le courant consommé double, puisque R est constant, le moteur tournera deux fois plus vite pour mettre sa *f. c. é. m.* « à la hauteur » ; si au contraire le courant consommé, et par suite $R I$, tombe au quart, la vitesse tombera aussi au quart, etc.

En d'autres termes, la vitesse du moteur dépend à chaque instant de l'intensité consommée par le client, de même que la vitesse de rotation d'un compteur à gaz dépend de la rapidité du débit ; dès lors, le nombre de tours du moteur en un temps donné, enregistré par les

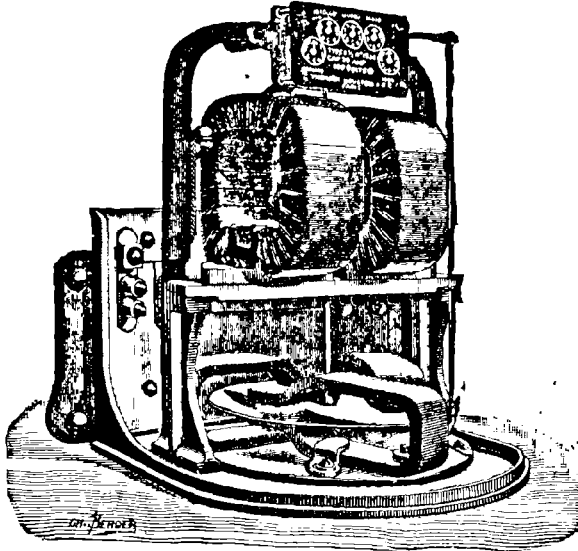


Fig. 130. — Compteur Thomson.

cadrons, dépend de la *quantité totale d'électricité* qui a passé dans le circuit pendant ce temps, comme le nombre de tours enregistré sur un compteur à gaz dépend de la quantité de gaz qui l'a traversé.

Le compteur O'Keenan mesure donc la quantité d'électricité consommée et doit régulièrement être gradué en *ampères-heures*.

C'est un *ampère-heure-mètre*.

Mais, si vous avez bien compris la différence qui existe entre quantité d'*électricité* et quantité d'*énergie électrique* (voir page 123) vous ne manquerez pas de remarquer que ce qui est intéressant, c'est de connaître non pas les ampères-heures, mais bien les *watts-heures* dépensés par l'abonné. C'est vrai ; seulement, il est aisé de déduire

l'un de l'autre puisque nos stations distribuent à *potentiel constant*, 100 ou 200 volts par exemple. Car un courant de 1 ampère débité sous une pression de 100 volts correspond à 100 watts et par suite, sous ce voltage, une quantité d'électricité de 1 ampère-heure correspond à une quantité d'énergie de 100 watts-heures ou 1 hectowatt-heure. Donc, si la distribution est à 110 volts, on aura les watts-heures dépensés en multipliant par 110 les ampères-heures indiqués par le compteur O'Keenan.

D'autres compteurs, tel le compteur Thomson (fig. 130), mesurent directement l'énergie consommée : ce sont des *watts-heures-mètres*.

Pendant longtemps les compteurs électriques ont été des instruments fort inexacts, et avaient alors tout ce qu'il fallait pour exciter la méfiance des abonnés ; mais grâce aux perfectionnements que le développement de l'électricité a rendus nécessaires, on est arrivé à en faire des instruments aussi exacts que le compteur à gaz.

UN CONSEIL EN PASSANT

Nous venons de parler de note à payer.

Nous avons admis — sans démonstration — que cette petite opération mensuelle était plutôt désagréable pour les intéressés : C'est donc le moment de donner un bon conseil qui permettra au consommateur de *lumière* tout au moins de faire diminuer dans une mesure fort appréciable les indications de son compteur : notez que je ne le prends pas pour un fraudeur !

L'usine d'électricité dont vous êtes tributaire vous vend de l'énergie très cher. A vous d'utiliser le mieux possible cette énergie pour le but désiré ; or, je suppose que vous en voulez faire de la lumière : vous l'envoyez vaille que vaille dans des lampes à incandescence ; pour vous le résultat est atteint et tout est pour le mieux dans le meilleur des mondes.

Vous vous trompez, et d'importance.

Comme toutes les transformations, la transformation de l'énergie électrique en radiations lumineuses ne se fait pas sans pertes, est affectée d'un certain rendement. Et justement, de toutes les transformations usuelles d'énergie, celle qui nous intéresse ici est à beaucoup près celle qui s'effectue dans les conditions les plus déplorables. Dans la lampe à incandescence usuelle, le rendement lumineux est d'à peine 1 0/0, c'est-à-dire que *quatre-vingt-dix-neuf* pour cent de cette énergie électrique qui nous coûte si cher est transformée en chaleur obscure, absolument perdue pour notre but. Vraiment, voilà qui ne

fait pas honneur à cette science dont nous nous enorgueillissons si fort, et il est grand temps que la lampe Nernst (voir page 109) et ses dérivés inévitables nous sortent un peu de ces rendements déplorables.

Que signifie cet état de choses ? c'est que si on vous mettait demain en possession d'un appareil dans lequel la transformation en lumière serait intégrale — tel le ver luisant — vous obtiendriez le même éclairage avec une dépense *cent fois moindre* : ce serait pour le coup de l'éclairage à bon marché !

Malheureusement, un tel appareil n'existe pas et n'existera pas de longtemps ; les tubes de Geissler, dont nous parlerons à propos de la bobine de Ruhmkorff, s'en rapprochent bien avec leur « lumière froide », mais leur puissance lumineuse est si faible qu'ils sont — pour le moment — inapplicables.

Toutefois — c'est ici que j'en voulais venir —, en modifiant les conditions habituelles de fonctionnement des lampes à incandescence, on peut améliorer beaucoup leur rendement, ce qui n'est pas étonnant, puisque ce rendement est si mauvais, donc si perfectible. Il suffit de les *pousser* un peu, c'est-à-dire d'augmenter un peu le voltage auquel elles sont soumises et partant la puissance qui vient s'y absorber : dans ces conditions la température s'élève, la lumière devient plus belle, plus blanche et le rendement lumineux s'améliore de telle façon que pour une augmentation de quelques volts la bougie, qui coûtait 3,5 à 4 watts, n'en coûte plus maintenant que 2,5 à 3.

Prenez donc des lampes de 10 bougies marquées 90 volts si le réseau qui vous alimente est à 100 volts, marquées 100 volts dans le cas d'un réseau à 110 volts : ces lampes de 10 bougies en donneront 15 ou 16 et votre compteur n'en tournera pas beaucoup plus vite.

Mais, m'objecterez-vous, il faut remplacer plus souvent les lampes poussées : c'est exact, mais, en vérité, qu'est-ce que cela peut bien vous faire si l'économie de courant est bien plus grande !

Et tel est bien le cas : vos lampes poussées dureront 200 heures au lieu de 600 ; bien ; donc, en 600 heures, vous aurez de ce chef à faire une dépense supplémentaire de $1,50 \times 2 = 3$ francs ; entendu ; mais vos 16 bougies, au lieu de 3,5 watts chacune, ne vous en coûteront plus que 2,5, soit en tout 40 watts au lieu de 56. Au lieu d'avoir dépensé dans vos 600 heures $56 \times 600 = 33.600$ watts-heures, vous n'en aurez dépensé que 24.000, soit, à 1 fr. le k. w. h., 24 francs au lieu de 33 fr. 60. En ajoutant aux 24 fr. les 3 fr. supplémentaires, vous voyez donc que vous réalisez encore une économie de 20 0/0, en même temps qu'au lieu d'une lumière jaune, indigne du nom de lumière électrique, vous obtenez une lumière agréable, d'une blancheur éblouissante.

Donc, poussez vos lampes sans remords, et le plus possible.

COURANTS VARIABLES

CHAPITRE DIX-HUITIÈME

SELF-INDUCTION

En examinant de plus près que nous ne l'avons fait jusqu'ici le mécanisme de la production du courant dans un conducteur, nous allons y découvrir certaines particularités fort intéressantes qui vont nous mettre sur la voie de nouveaux phénomènes.

Faisons un nouvel appel (fig. 131) à une vieille connaissance depuis longtemps délaissée, notre système de vases communicants A et B, et ouvrons le robinet commandant le tuyau qui les réunit. Vous savez très bien que l'écoulement de l'eau, surtout si le tuyau est gros et long, ne prend pas instantanément sa valeur normale parce que ce liquide présente une certaine *inertie*. Comme au train qui démarre, comme à la machine qui se met en route, il lui faut un certain temps pour vaincre cette inertie et acquérir sa vitesse normale, définie par la différence de niveau agissante et les dimensions du tuyau.

Ainsi donc, l'écoulement normal dans un tuyau est précédé d'une *période variable* pendant laquelle le courant, d'abord nul, augmente constamment.

En électricité, il se passe quelque chose d'exactly analogue au moment où un courant s'établit dans un conducteur. Un conducteur électrique, *outre sa résistance*, oppose tou-

jours au passage du courant une certaine *inertie*. Disons tout de suite — quitte à le justifier tout à l'heure — que cette inertie spéciale s'appelle la *self-induction*. Aussi, lorsque le conducteur est fermé sur une diff. de pot. constante (fig. 132), le courant ne prend pas d'un seul coup son régime normal, celui qui est défini par la loi de Ohm ; il commence par être très faible, et, comme le courant d'eau, augmente petit à petit pour atteindre sa valeur de régime. Quand je dis petit à petit, entendons-nous, car dans les conducteurs présentant le plus possible de cette *inertie* spéciale, le plus possible de self-induction, le courant a sensiblement pris en quelques secondes sa valeur normale.

Ainsi donc, dans un conducteur quelconque, le *régime permanent* défini par la loi de Ohm est précédé d'un *régime*.

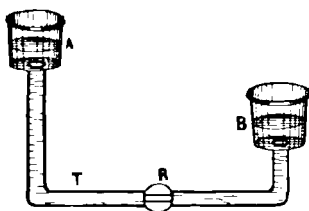


Fig. 131. — Par suite de l'inertie, le liquide met un certain temps à se mettre en mouvement lorsqu'on ouvre R.

variable dans lequel le courant se rapproche graduellement de sa valeur normale.

Cherchons à comprendre le mécanisme de ce phénomène.

Vous savez qu'un corps en *mouvement* diffère d'un corps *au repos* en particulier parce qu'il renferme une certaine *quantité de mouvement*, c'est-à-dire une certaine énergie, qui se manifeste par des effets mécaniques dont le corps en mouvement est susceptible : les conséquences si terribles de la rencontre de deux trains ou de deux navires, les effets des balles ou des boulets ne sont autre chose que des manifestations de cette énergie.

Or, lorsque le liquide de notre tuyau a pu s'écouler par suite de l'ouverture du robinet R, il a passé du repos au mou-

vement. Il a fallu, d'après ce qui précède, qu'il absorbe sous forme de quantité de mouvement une certaine énergie ; mais de l'énergie ne se crée pas, nous le savons, et si le liquide en absorbe, c'est qu'il l'a prise quelque part. Où ? Ce n'est pas aux dépens du liquide resté dans A, puisque ce liquide est toujours au même niveau et possède toujours, par suite, la même quantité d'énergie disponible. Cela ne peut donc être qu'aux propres dépens de l'énergie spéciale que le liquide qui s'écoule, lui-même, détenait de par son niveau primitif.

Comme cette énergie *potentielle* renfermée par le liquide est restreinte, il faut qu'une certaine quantité s'en écoule avant que toute la quantité de mouvement nécessaire soit cédée : mais pendant toute cette période d'emprunt, le liquide ne possède qu'une vitesse réduite, qui s'augmente constamment. La vitesse commence donc par être très faible, pour se rapprocher graduellement de la vitesse normale.

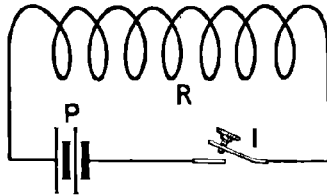


Fig. 132. — Par suite de l'inertie magnétique ou self-induction, le courant met un certain temps à prendre son régime lorsqu'on ferme I.

Tel est, pour les liquides, le mécanisme de la période variable.

Pour le conducteur électrique, les choses se passent de la même façon :

Un conducteur électrique traversé par un courant diffère d'un conducteur inerte en ce que l'espace qui l'entoure est dans un état particulier que nous avons dénommé *champ magnétique*.

Pour *créer* ce champ magnétique, il faut absorber une certaine quantité d'énergie électrique : c'est l'équivalent de l'énergie absorbée sous forme de quantité de mouvement par l'eau qui coule dans un tuyau ; une fois créé, le champ persiste autant que le courant, *sans exiger de nouvelle dépense d'énergie*, pas plus que n'en exige la conservation

du champ magnétique d'un aimant permanent. Donc, s'il y a absorption d'énergie, cette absorption se limite tout entière au moment où le champ est créé, c'est-à-dire au moment où le courant commence à circuler. Il est donc tout naturel qu'ici, comme dans le cas du courant d'eau, le courant électrique ne prenne pas tout à coup sa valeur normale, mais l'atteigne progressivement.

Nous voici donc bien fixés. Si, lors de la fermeture du circuit le courant ne prend pas tout d'un coup sa valeur normale, c'est qu'il y a absorption, *emmagasinement*, sous une forme spéciale, d'une certaine quantité d'énergie électrique empruntée à la source.

Cet emmagasinement, bien qu'il n'ait pas l'air de tirer à conséquence, nous donnera, tout à l'heure, la clef de quelques phénomènes importants.

Il nous permet dès à présent, ce qui est très intéressant, de donner un nouveau croc-en-jambe à la loi de Ohm qui, grâce à lui, ne peut plus s'appliquer à aucun circuit que dans des conditions spéciales. En effet, l'*emmagasinement* d'énergie, sous forme de champ magnétique, est tout autre chose que la *dépense* de cette énergie sous forme de chaleur : il y a production, dans cette période variable, d'un phénomène extérieur, de sorte que l'intensité du courant est alors représentée, non par la loi de Ohm, mais par une relation compliquée qui dépend à la fois de la résistance du conducteur, de son *coefficient de self-induction* et du temps écoulé depuis la fermeture du circuit.

Ce n'est qu'après cette période d'emmagasinement que l'énergie envoyée par la source ne servant plus à rien d'autre qu'à l'échauffement du conducteur, la loi de Ohm devient applicable au circuit (1). Et alors, le régime permanent une fois atteint, le débit est exactement le même que si la self-induction n'existait pas.

Lorsqu'il ne s'agit que d'un conducteur rectiligne, le champ qui l'entoure est très faible ainsi que l'accumulation d'énergie.

On obtient un champ beaucoup plus intense, comme nous

(1) A condition, bien entendu, qu'il n'y ait ni moteur ni cuve électrolytique dans ce circuit.

le savons, et par conséquent un emmagasinement plus grand, lorsque le conducteur est enroulé sous forme de bobine.

Enfin, les effets sont portés à leur maximum, la self-induction devient très grande quand, dans la bobine, on introduit un *noyau de fer*.

Dans ces conditions, l'emmagasinement devient si grand qu'on peut mettre en évidence la période variable en intercalant dans le circuit de la bobine (fig. 133) un ampèremètre *apériodique* (à indications rapides). Lorsqu'on ferme le circuit, on voit l'aiguille arriver *lentement* à sa position d'équilibre. Si, au contraire, on enlève le noyau de fer, on rend presque nulle la self induction, et à l'établissement du courant, l'aiguille de l'ampèremètre arrive *brusquement* à sa position d'équilibre.

Mais le propre d'un emmagasinement, c'est d'être restitué à un moment quelconque.

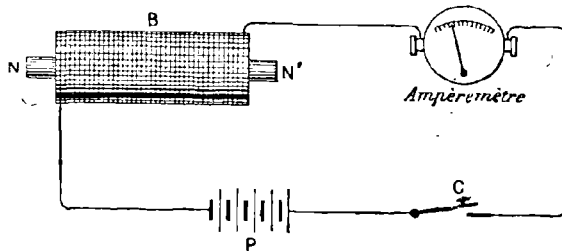


Fig. 133. — Mise en évidence de la période variable.

Que devient l'énergie emmagasinée autour de notre conducteur pendant la période variable, au moment où nous interrompons le courant ?

Pour répondre à cette question, nous allons nous adresser à notre tuyau contenant de l'eau en mouvement et un phénomène bien connu, celui du *coup de bélier*, va nous donner la réponse.

Interrompons tout d'un coup le courant liquide en fermant vivement le robinet (fig. 134). Le mouvement étant brusquement arrêté, la quantité de mouvement emmagasinée, qui n'avait d'autre raison d'être que ce mouvement, devient brusquement disponible : il faut à toute force qu'elle se dépense. Aussi, si la différence de niveau est grande, le courant d'eau

rès rapide, il se produit contre les parois du tuyau une réaction violente, un choc énergétique que l'on entend parfaitement et dans lequel se dépense l'énergie libérée.

C'est le coup de bélier.

Imaginons maintenant que, avant le robinet R (fig. 134), nous ayons placé un tube t ouvert à son extrémité. Au moment où nous fermerons le robinet, l'eau n'aura plus à dépenser son énergie en cherchant à distendre les parois de T, puisqu'elle trouvera dans t un chemin plus facile. Aussi, au moment de la fermeture, un jet d'eau s'élancera-t-il de t pour jaillir à un niveau *bien supérieur* à celui du liquide dans le vase A.

Conclusion, utilisée par Mongolfier dans son *bélier hydraulique*, le coup de bélier produit par un courant liquide peut

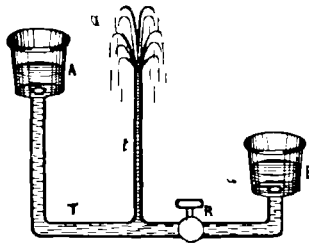


Fig. 131. — Coup de bélier.

engendrer des différences de niveau *beaucoup plus grandes* que celle même qui a donné naissance au courant.

Lorsque nous ouvrons un circuit électrique présentant une grande self-induction et traversé par un courant intense, nous constatons la production au point de rupture d'une forte étincelle, l'étincelle de rupture ou d'*extra-courant*. Eh bien! cette étincelle correspond précisément au coup de bélier : le champ produit par le conducteur a brusquement disparu : l'énergie qu'il détenait devient donc tout d'un coup disponible : par suite de cette disparition du champ, il y a eu dans le conducteur une *variation de flux*, qui a induit une force électromotrice. Comme cette variation a été très rapide, la f. é. m. induite a été elle-même très élevée, *beaucoup plus élevée* que celle de la source — de même que la différence de niveau engendrée par le coup de bélier — et de cette f. é. m. élevée est résulté une étincelle violente.

Si la self-induction est grande et le courant intense, l'énergie emmagasinée devient considérable et les f. é. m. de self-induction provoquées à la rupture peuvent devenir fort dangereuses. Ainsi, si on coupait brusquement en pleine marche le circuit des inducteurs d'une puissante dynamo, on pourrait provoquer des tensions suffisantes pour percer l'isolant.

Expérimentalement, il est facile de voir l'influence de la self-induction sur la force des étincelles de rupture à l'aide du même appareil (fig. 133) qui nous a permis tout-à-l'heure de constater *de visu* l'existence de la période variable. Que le noyau soit enfoncé ou non, l'ampèremètre nous indique toujours le même courant *permanent*, 5 ampères par exemple, mais dans le premier cas, la self-induction étant très forte, les étincelles à la rupture sont incomparablement plus fortes que lorsque le noyau est retiré.

D'après ce que nous avons vu, c'est à l'induction du circuit *sur lui-même* qu'est due l'étincelle de rupture. De même électriquement parlant, le retard à l'établissement du courant provenait de ce que le flux embrassé par le circuit, passant de zéro à une certaine valeur, induisait dans le circuit, pendant cette période variable une force électromotrice *opposée* à la f. é. m. de la source, une force contre-électromotrice de *self-induction* comme on dit. Mais si cette f. é. m., provenant d'une *augmentation* de flux, était opposée au courant — de même que la f. c. é. m. d'une cuve électrolytique ou d'un moteur, — la f. é. m. développée à la rupture, provenant d'une *diminution* de flux, est opposée à la première (voyez loi de Lenz page 175), de sorte que l'extra-courant est de *même sens* que le courant normal.

Une expérience fort élégante imaginée par M. Fleming met bien en évidence les curieuses propriétés de la self-induction.

Alimentons par une batterie d'accumulateurs un électro-aimant à gros fil shunté par une lampe à incandescence choisie de façon à n'être portée qu'au rouge sombre par la faible diff. de pot. qui existe à ses bornes une fois le régime permanent établi.

En rompant brusquement le circuit des accumulateurs par

un interrupteur, on voit la lampe briller pendant un instant d'un vif éclat. Au moment de la rupture en effet, l'énergie mise en liberté par la disparition du champ a à sa disposition deux chemins pour se dépenser : l'espace d'air peu conducteur qui sépare les deux parties de l'interrupteur, et le circuit fourni par la lampe.

Elle choisit évidemment de ces deux chemins le moins résistant, c'est-à-dire que dans ces nouvelles conditions l'étincelle de rupture est à peu près supprimée et que toute l'énergie mise en jeu vient se dissiper en un temps très court dans la lampe. Donc, puissance instantanée très grande, qui porte au rouge blanc le filament.

Nous retrouvons ici quelque chose que nous savions déjà, à savoir, que les tensions développées pendant un instant très court par la self-induction sont *bien plus grandes* que celles produites par la source elle-même.

Nous apprenons de plus qu'un moyen de supprimer les étincelles de rupture, quelquefois gênantes, consiste à shunter la self du circuit par une résistance assez grande pour ne pas réclamer un débit supplémentaire trop grand.

Un meilleur moyen, parce qu'il ne réclame à la source aucun débit supplémentaire, consiste à shunter l'interrupteur lui-même par une résistance assez grande, dans laquelle passe l'extra-courant et que l'on retire elle-même après la rupture.

En résumé, les phénomènes que nous venons d'examiner sont dus à l'induction d'un circuit sur lui-même ; le nom de *self-induction* est donc bien justifié, le mot self signifiant en anglais *soi-même* ; mais le mot *auto-induction* le serait tout autant, sans aller chercher si loin des expressions que notre langue est toute disposée à nous fournir.

Il est évident que la quantité d'énergie emmagasinée pour créer le champ magnétique d'une bobine de self dépend de la *grandeur* de la self-induction correspondante. Si la self-induction est grande, la quantité emmagasinée sera grande ; si elle est faible, il en sera de même de la quantité d'énergie emmagasinée. Mais ces expressions, *grande* self-induction, *faible* self-induction, sont très vagues et l'on ne peut s'en contenter. Aussi, comme pour les autres grandeurs d'électricité,

on a créé pour la self-induction une unité spéciale, l'**henry**, du nom d'un physicien américain.

Représentons par L la self-induction d'une bobine exprimée en henrys. On démontre que la quantité totale d'énergie emmagasinée pour un courant de I ampères traversant cette bobine en régime permanent, est en watts-secondes ou *joules*

$$W = \frac{1}{2} L I^2 ;$$

le joule est égal à 0,1 kilogrammètre environ. Si donc nous avons une bobine de 10 henrys traversée par un courant de 10 ampères, nous obtiendrons :

$W = \frac{1}{2} \times 10 \times 100 = 500$ joules = 50 kilogrammètres. Supposons que la rupture se fasse assez brusquement pour que l'étincelle dure seulement 0,1 seconde : les 50 kilogrammètres étant dépensés en 0,1 seconde correspondront à une *puissance* de $50 \times 10 = 500$ kilogrammètres par seconde, soit près de 7 *chevaux* qui seront mis en jeu dans cette étincelle ; or, si la résistance ohmique du circuit est, mettons de 2 ohms, la force électromotrice nécessaire pour produire le débit de 10 ampères est de 20 volts seulement et la puissance du générateur n'est par conséquent pas supérieure à $20 \times 10 = 200$ vatts, soit *un quart de cheval* environ. On s'explique, par ces chiffres, les effets destructifs qui peuvent résulter de ces phénomènes d'extra-courant.

RÉSUMÉ

Lorsqu'on soumet un circuit à l'action d'une diff. de pot., e régime normal du courant ne s'établit pas immédiatement et est précédé d'une période de *régime variable* pendant laquelle le courant arrive petit à petit à la valeur définie par la loi de Ohm. Ce phénomène est dû à l'absorption d'énergie entraînée par la création du champ magnétique qui entoure les conducteurs traversés par le courant, énergie qui redevient libre à la rupture du circuit et se manifeste alors par une étincelle d'*extra courant* : les choses se passent comme si le circuit pré-

sentait une certaine *inertie*. A cette inertie spéciale on donne le nom de *self-induction* parce que ces absorptions et ces restitutions d'énergie se font par l'intermédiaire des forces électromotrices d'induction développées par les variations du champ sur le circuit *lui-même* : f. é. m. *opposée* à la diff. de pot. agissante au moment de l'établissement du courant, f. é. m. *de même sens* au moment de sa disparition. Comme la disparition du champ est très brusque lors d'une rupture, il en résulte que la f. é. m. développée peut être beaucoup plus grande que la f. é. m. agissante.

On exalte considérablement la self-induction d'une bobine en la munissant d'un noyau de fer doux, parce que le champ produit est beaucoup plus intense, et correspond à un emmagasinement d'énergie plus grand.

On évalue la self-induction à la grandeur des effets qu'elle produit et on la mesure en *henrys*.

CHAPITRE DIX-NEUVIÈME

APPLICATIONS DE LA SELF-INDUCTION

Rôle protecteur de la self-induction dans les machines à courant continu; disjoncteurs. — Quand nous parlerons des phénomènes dus au courant alternatif, la considération de la self-induction prendra une importance capitale.

Dans le courant continu, son rôle est plus effacé, car presque tous les phénomènes que l'on y rencontre sont relatifs au régime normal du courant, au régime permanent, dans lequel elle n'a à intervenir d'aucune façon. Pourtant, nous pouvons citer ici même quelques applications intéressantes de la self-induction.

D'abord, la self-induction des machines à courant continu joue modestement un rôle protecteur qu'il n'est que juste de reconnaître : si cette self-induction était nulle, les courants qui prennent naissance en cas de court-circuits accidentels sur les circuits alimentés par ces machines prendraient instantanément une valeur énorme, susceptible de détériorer gravement ces machines, surtout dans le cas d'une excitation en série.

Mais la présence de la self-induction empêche le courant d'acquiescer instantanément cette valeur : le courant doit croître relativement lentement et la machine se trouve alors protégée par le fonctionnement du *disjoncteur automatique* (fig. 135), que l'on intercale en général entre la machine et le circuit d'utilisation, ce disjoncteur étant constitué par un électro-aimant qui attire une armature coupant le circuit dès que le courant circulant dans l'électro acquiesce une valeur susceptible de compromettre la machine.

Allumoirs. — Puisque la self-induction développe à la rupture

d'un circuit à grande self une f. é. m. beaucoup plus élevée que celle de la source, il est tout indiqué dans certaines circonstances de profiter de ce fait : c'est le cas par exemple, lorsque nous ne disposons que d'une f. é. m. inférieure à celle qui nous est nécessaire, et que d'autre part celle-ci ne doit servir que pendant un instant très court. C'est ce qu'on fait d'une assez heureuse façon dans certains *allumoirs* électriques.

Souvent, un allumoir comporte tout simplement un fil fin de platine placé au voisinage d'une petite lampe à essence. Lorsqu'on fait passer le courant de quelques éléments de pile dans ce fil en appuyant sur le bouton d'un interrupteur, il rougit et enflamme les vapeurs d'essence. Une batterie de 4 ou 5 éléments Leclanché est suffisante pour alimenter dans une maison autant de ces allumoirs que l'on veut, en même temps que les sonneries et les réveille-matin, à

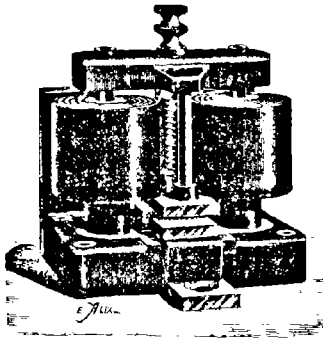


Fig. 137. — Disjoncteur automatique Bréguet.

condition toutefois que ces éléments soient à faible résistance intérieure et que pour cela les bâtons de zinc traditionnels y soient remplacés par des zincs circulaires. Mais ces allumoirs présentent des inconvénients : le fil est fragile, fond facilement si le courant est d'aventure un peu trop énergique, ne rougit pas du tout au contraire si la pile est tant soit peu polarisée.

Aussi leur préfère-t-on souvent les allumoirs à self-induction ou à extra-courant dans lesquels un circuit à faible résistance et à grande self-induction est constitué (fig. 136) par un électro-aimant à noyau de fer droit lamellé.

La fermeture du circuit est effectuée par un interrupteur d'un genre spécial et la rupture se fait en un point situé en regard d'une lampe à essence.

Par suite de la self-induction considérable du circuit et du courant

assez énergique qui l'a traversé, l'étincelle d'extra-courant est suffisante pour mettre le feu aux vapeurs d'essence. Employées directement, les piles auraient été parfaitement incapables de fournir cett

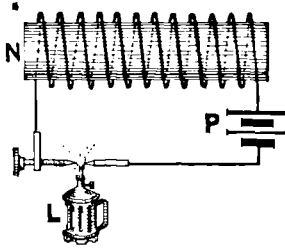


Fig. 136. — Allumoir à self-induction.

étincelle, mais en passant par l'intermédiaire de la self-induction et de l'accumulation d'énergie qu'elle procure, on a créé à leur aide pendant un instant très court mais suffisant une force électromotrice élevée, susceptible de produire l'effet désiré.

PARAFOUDRES

Si chétif, si impuissant que l'homme puisse paraître devant cette imposante manifestation de la nature qui s'appelle la foudre, il a le droit de s'enorgueillir en pensant qu'il peut aujourd'hui la braver impunément.

L'admirable invention de Franklin, le *paratonnerre*, en offrant à la décharge atmosphérique un chemin qu'il lui faut suivre bon gré mal gré jusqu'à une nappe liquide souterraine, a transformé ses plus terribles accès de fureur en simples... coups d'épée dans l'eau.

Pourtant, il est des cas où la lutte contre la foudre est moins facile, car nous semblons prendre à tâche de l'introduire dans l'intérieur de nos demeures. Ce sont précisément les applications de l'électricité qui nous ont conduits à ces témérités.

Ainsi, les fils télégraphiques qui sillonnent les campagnes, qui y sont sur leur immense développement les témoins de tant d'orages, sont fréquemment frappés par la foudre, et le nombre est grand des poteaux télégraphiques qui portent de ces visites les marques indélébiles. Or, la décharge électrique doit nécessairement se propager le long du chemin que lui offre le fil télégraphique et arriver jusqu'aux appareils, où elle foudroiera les employés.

De leur côté, les canalisations aériennes employées dans certaines

villes pour la distribution de l'énergie électrique peuvent entraîner des conséquences aussi terribles.

Et cependant, dans un cas comme dans l'autre, il est impossible d'interrompre la continuité métallique, ce qui donnerait bien la sécurité cherchée, mais ce qui en même temps supprimerait la raison d'être de ces canalisations.

Il ne serait donc guère agréable d'être employé de télégraphe ou abonné de secteur électrique si nos ingénieurs n'avaient réussi à disposer entre la canalisation et les locaux dans lesquels elle pénètre un obstacle qui, facilement franchi par le courant d'utilisation, soit insurmontable pour l'électricité atmosphérique.

Cet obstacle s'appelle un *parafoudre* et la partie capitale de ce parafoudre consiste généralement en une self-induction L, L' , dont le rôle est bien facile à comprendre (fig. 137).

La décharge atmosphérique est un phénomène sinon instantané,

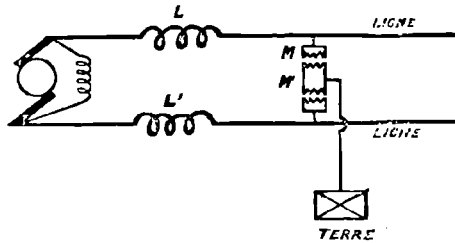


Fig. 137. — Parafoudre.

du moins d'une extrême brièveté. Sous la diff. de pot. énorme qu'elle provoque, un courant tend bien à traverser la self-induction, mais non-seulement ce courant n'arrive pas au régime permanent, ce qui demanderait une notable fraction de seconde, mais encore, au moment où la diff. de pot. s'évanouit, il n'a eu le temps d'acquiescer qu'une valeur extrêmement faible.

En somme, la résistance qu'oppose la self-induction au passage de l'électricité atmosphérique est énorme grâce à la quasi-instantanéité du phénomène, et la foudre ne peut aller plus loin. Elle aurait d'ailleurs d'autant plus mauvais goût d'insister que tout près on a disposé un chemin bien plus facile pour elle, constitué par deux plaques métalliques MM' munies de pointes placées en regard, très près l'une de l'autre et communiquant l'une avec la ligne, l'autre avec la terre.

Le courant à utiliser, lui, traverse au contraire très facilement la self-induction par suite de sa durée prolongée, et ne peut passer par le chemin réservé à la foudre, dont la résistance est pour lui insurmontable.

CHAPITRE VINGTIÈME

INDUCTION MUTUELLE DE DEUX CIRCUITS

Nous allons compliquer un peu la bobine de self-induction que nous manipulions page 232; nous y superposerons, sur l'enroulement qu'elle comportait, un 2^e enroulement (fig. 138); celui-ci, lors de l'établissement du courant primaire et lors de sa suppression, va se trouver soumis exactement aux mêmes variations de flux que le circuit primaire lui-même. Donc, des f. é.m. d'induction vont prendre naissance dans ce circuit secondaire, et des courants induits y circuleront si ce circuit est fermé sur lui-même ou sur une résistance.

Où est prise cette énergie qui apparaît ainsi dans le secondaire ? Ce ne peut être évidemment qu'à l'énergie que le primaire amène de la source d'électricité : si on observe la période variable d'établissement du courant dans le primaire, on la trouve en effet complètement modifiée lorsqu'on vient à fermer le secondaire, parce que c'est dans cette période, nous l'avons vu, que de l'énergie est transmise au champ, et qu'on doit transmettre, en plus, celle qui se dépense dans le secondaire quand celui-ci est fermé. De même, on constate que l'étincelle d'extra-courant primaire est moindre si le secondaire est fermé parce que l'énergie libérée par la disparition du champ, au lieu d'être obligée de se dépenser toute dans cette étincelle, peut maintenant se porter en grande partie dans le circuit secondaire.

Ainsi, voilà du nouveau : voilà deux circuits complètement *isolés* l'un de l'autre par la soie ou le coton qui recouvre le fil, et qui pourtant échangent leur énergie avec la plus grande

facilité grâce au champ magnétique qui forme entre eux un lien intime !

Décidément, il ne nous faut pas prendre trop à la lettre cette expression d'*isolants* que l'on accepte trop souvent au sens absolu du mot. Nous aurons l'occasion de donner plus loin une idée des hypothèses faites à ce sujet par le grand savant anglais Maxwell.

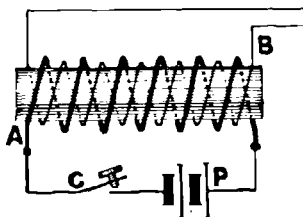


Fig. 138. — Induction mutuelle.

Mais, avant d'aller plus loin, nous allons nous aider d'une représentation hydraulique — assez grossière à la vérité — pour saisir plus aisément certains de ces phénomènes de self-induction et d'*induction mutuelle*.

Voyons d'abord la self-induction.

Continuons à représenter un conducteur à grande self-induction que traverse un courant, par un tuyau T gros et long, possédant une grande inertie, alimenté par un vase A.

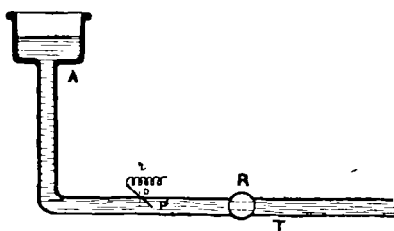


Fig. 139. — Représentation hydraulique de la self-induction.

Mais de plus imaginons dans ce tuyau une palette P articulée en son centre O et obstruant en partie la section du tuyau T (fig. 139). Cette palette est soumise à l'action d'un ressort r qui, lorsque le robinet R est fermé, est détendu de telle sorte que la palette au repos, comme l'indique la position en pointillé, est exactement perpendiculaire au tuyau.

Lorsqu'on ouvre R, le liquide se mettant *progressivement* en mouvement par suite de son inertie, entraîne avec lui la palette qui, tendant le ressort, prend une inclinaison graduellement plus grande et arrive finalement à la position indiquée sur la figure 139, position où la tension du ressort fait exactement équilibre à la pression exercée sur la palette par le liquide en mouvement. La tension plus ou moins grande du ressort, l'inclinaison plus ou moins grande de la palette correspondront pour nous aux différentes valeurs du *champ* produit par notre circuit à self-induction, la palette fortement inclinée correspondant à un champ intense et inversement.

1° L'examen que nous venons de faire du mouvement de la palette au moment de l'ouverture de R nous montre par analogie que : *lorsqu'un courant électrique traverse un circuit présentant de la self-induction, il se produit un champ magnétique qui augmente progressivement jusqu'à une certaine limite, atteinte lorsque le courant arrive au régime constant défini par la loi de Ohm.*

2° Toute variation du débit dans T est évidemment accompagnée d'un changement dans la position de la palette. De même, *toute variation de courant dans un circuit électrique est accompagnée d'une variation du champ produit.*

3° En cas de variation du courant liquide, la palette commence à se mettre en mouvement lorsque le courant commence à varier, pour n'arriver à sa nouvelle position que lorsque le courant cesse de varier. De même, *le temps de la variation d'intensité du champ magnétique est précisément égal à celui de la variation du courant inducteur.*

4° Fermons R: le ressort se détend et ramène la palette à sa position initiale : *Le champ magnétique disparaît avec le courant qui l'a produit.*

5° Invertissons le sens du courant dans T en portant le vase A à l'autre bout. La palette est entraînée *en sens inverse* en comprimant r: *lorsque nous inversons le sens du courant électrique, nous devons inverser le sens du champ produit*, ce que constate aussi l'application de la loi du tire-bouchon de Maxwell (page 156).

Somme toute, nous ne faisons que retrouver ici, peut-être rendues un peu plus visibles, les particularités déjà étudiées

de la self-induction. Mais pour l'induction mutuelle, les avantages du même mode de représentation vont devenir plus appréciables et nous donner avec une réelle simplicité des résultats qu'il serait délicat de demander à d'autres raisonnements.

Pour cet ordre de phénomènes, l'adaptation de notre mode de représentation est facile : Considérons la figure 140.

Nous y voyons, à côté de notre tuyau de tout à l'heure, T, un autre tuyau T', rempli d'eau, fermé sur lui-même, qui, vous vous en doutez, va jouer le rôle d'un circuit électrique fermé. La palette à ressort P peut se déplacer dans T' sous l'influence des courants liquides provoqués en T.

D'après ce qui précède, le tuyau T alimenté par A correspond au circuit inducteur A, alimenté par la pile P (fig. 140) T' correspond au circuit induit B, et la palette P, qui forme

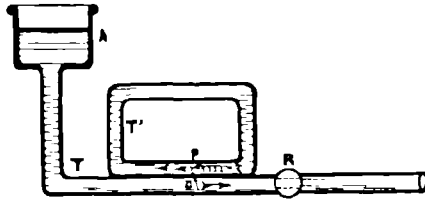


Fig. 140. — Représentation hydraulique de l'induction mutuelle de 2 circuits.

une sorte de lien entre T et T', correspond au champ magnétique créé par A (fig. 138), qui est de son côté le lien entre A et B.

Ouvrons R (fig. 140) : sous l'effet du courant d'eau croissant de T, la palette se déplace et pousse le liquide de T' à la façon d'une rame, déterminant dans celui-ci un courant liquide. *Fermons* C (fig. 138). (On sait que par une bizarrerie de langage déjà signalée *fermer* l'interrupteur C équivaut à *l'ouvrir*, si on le considère comme un robinet); nous savions déjà que sous l'influence du courant électrique croissant dans A, le champ magnétique qui se forme produit dans B un courant induit; l'analogie précédente nous donne de plus le *sens* de ce courant : il est *inverse* de celui du courant qui lui a donné naissance, comme la loi de Lenz nous l'aurait d'ailleurs indiqué.

Refermons R : la palette revient à sa place, donc la quantité de liquide de T' déplacée à droite, lors de l'ouverture du robinet, est égale à celle déplacée vers la gauche lors de la fermeture. C'est l'image de cette loi d'électricité que *la quantité d'électricité correspondant au courant induit de rupture est égale à celle du courant de fermeture.*

Mais à la fermeture de R, le liquide s'arrêtant brusquement, la palette est revenue à sa position de repos bien plus vite qu'elle n'avait pris sa position d'équilibre, lors de l'établissement du courant, par suite de l'inertie considérable admise pour le liquide de T. Le courant liquide induit, plus bref, est par compensation plus intense. De même, la disparition du champ est toujours plus brutale que son établissement, et il en résulte que la quantité d'électricité du courant induit de rupture est mise en jeu sous un potentiel *plus élevé* que celui du courant de *fermeture.*

Nous nous souviendrons de ce fait à propos de la bobine de Ruhmkorff.

Il n'est d'ailleurs pas nécessaire, vous le remarquez, d'ouvrir ou de fermer complètement R pour *induire* des courants liquides dans T'. Il suffit de produire une *variation* quelconque du courant dans T en ouvrant plus ou moins R.

Donc, d'une manière générale, nous concevons que *toute variation de courant dans le circuit inducteur A entraîne la production d'un courant dans le circuit induit B.*

De plus, l'examen des mouvements de la palette nous fait encore voir que *si le courant inducteur augmente, le courant induit qui en résulte est de sens inverse du courant inducteur, tandis que si ce dernier diminue, le courant induit est de même sens.*

Supposons enfin que le courant liquide, après avoir augmenté constamment et produit par conséquent un courant induit de sens inverse, cesse d'augmenter, puis diminue.

La palette atteignant son inclinaison maxima, puis revenant en arrière, nous en concluons par analogie que la force électromotrice induite doit changer de sens et qu'elle s'est *annulée* précisément alors que le courant inducteur et le champ produit avaient *leur plus grande valeur.*

Les choses se passent de même si, après avoir diminué, le courant inducteur cesse de diminuer, puis augmente.

Ainsi, la f. é. m. induite s'annule et change de sens chaque fois que le flux inducteur passe, soit par un maximum, soit par un minimum (1). Notez que je dis la f. é. m. : pas le courant, qui, par suite de la self-induction, est toujours en retard sur la f. é. m. induite, comme nous l'expliquerons en parlant du courant alternatif, et comme il serait arrivé aussi pour le courant liquide de T' si, dans les raisonnements précédents, je n'avais pas volontairement négligé l'inertie, de manière à ce que le courant liquide puisse suivre exactement les mouvements de la palette.

Mais c'est assez interroger notre système.

Si on continuait, on finirait par lui faire dire des... bêtises!

Nous l'avons dit, nous le répétons, tout comme à la plus belle fille du monde il ne faut demander aux comparaisons hydrauliques, surtout aux précédentes, que ce qu'elles peuvent donner.

Au point de vue pratique, une leçon immédiate est à tirer des faits que nous venons de constater. Si, fermant le circuit primaire, on laisse le courant atteindre son régime permanent et si on ne le rompt qu'au bout d'un certain temps, toute la dépense d'énergie correspondant au temps pendant lequel le courant reste *constant* est absolument perdue au point de vue des effets d'induction : pour créer des courants induits, nous venons de le voir, il faut qu'il y ait variation du courant inducteur ; sinon, toute l'énergie de ce dernier se transforme en chaleur.

Nous concevons donc que lorsqu'on voudra obtenir ces effets d'induction dans d'aussi bonnes conditions que possible, on devra, après avoir établi le courant primaire, l'interrompre aussitôt qu'il arrivera au régime permanent et même un peu avant s'il y a moyen. Comme la durée d'établissement du courant est petite, il en résulte qu'il faudra une succession de fermetures et de ruptures extrêmement rapides : ce faisant, nous n'augmenterons pas la quantité d'énergie mise

(1) Cette remarque nous a déjà été fort utile pour établir la théorie des dynamos à courant continu.

en jeu à chaque variation de flux, mais nous multiplierons le nombre des courants induits et par suite la puissance moyenne produite dans le circuit induit.

Nécessité du fer dans les bobines d'induction mutuelle. — Si rapide qu'on fasse cette *fréquence* des ruptures, elle serait encore fort insuffisante pour empêcher le courant d'atteindre bien plus vite encore son régime permanent si les bobines ne contenaient pas de fer.

Car, dans ces conditions, la self-induction de la bobine induite étant très faible, la période d'établissement du courant serait extrêmement rapide. Donc, première conséquence de l'absence de fer, rendement très mauvais, puisque presque toute l'énergie fournie par la pile se transformerait en chaleur dans le circuit inducteur d'après la loi de Ohm.

Seconde conséquence, aussi importante : sans fer, l'induction est peu intense ; donc on ne peut véhiculer du primaire au secondaire à chaque variation qu'une petite quantité d'énergie ; donc, les effets obtenus sont presque nuls.

L'emploi du fer s'impose par conséquent ; mais ici, bien qu'il soit immobile comme dans les inducteurs des machines à courant continu, il est de toute nécessité de le feuilletter pour s'opposer aux courants de Foucault qui, sans cela, absorberaient pour leur formation la presque totalité de l'énergie mise en jeu à chaque variation du champ.

Notre comparaison hydraulique de tout à l'heure nous a renseignés sur beaucoup de particularités des phénomènes d'induction mutuelle : c'est une justice à lui rendre qu'elle a laissé dans l'ombre la plus importante de toutes, la propriété de *transformer* les facteurs de l'énergie électrique.

TRANSFORMATEURS

Supposons en effet, qu'un circuit inducteur étant donné, nous enroulions sur le noyau un circuit comportant une spire unique, la force électromotrice induite dans ce circuit au moment de la rupture sera faible. Une autre spire unique enroulée de la même façon produira une faible f. é. m. égale à la précédente : couplons ces deux spires en tension ; les

f. é. m. s'ajoutant, nous aurons un circuit de deux spires dont la f. é. m. sera double de celle d'une seule.

Rien n'empêche ce petit raisonnement d'être répété indéfiniment : A mesure que nous ajouterons les spires induites les unes aux autres, la f. é. m. induite augmentera. Quand le nombre de spires secondaires atteindra celui du primaire, les f. é. m. secondaires seront sensiblement égale aux f. é. m. de self-induction primaires. Or, rappelez-vous le bélier hydraulique : nous avons vu que la f. é. m. de self de rupture était bien plus grande que celle de la source. Il peut donc en être déjà de même de la f. é. m. induite. Nous n'avons d'ailleurs toujours pas de raison de nous arrêter : continuons à ajouter à notre circuit induit les milliers de tours aux milliers de tours jusqu'à ce que la place nous fasse défaut ; la f. é. m. induite augmente toujours et finit par devenir énorme.

Conclusion : alimentant le primaire avec une source de quelques volts, nous pourrions obtenir au secondaire des étincelles, des effets physiologiques et bien d'autres choses curieuses correspondant à des tensions de milliers de volts!

Mais en même temps, les intensités mises en jeu seront très faibles, car la résistance du fil fin et long constituant le secondaire est nécessairement très grande ; et au surplus, la puissance envoyée au primaire ne pouvant être énorme, il en est ainsi à plus forte raison de la puissance secondaire, de sorte que la tension ne peut être très grande qu'à la condition que les courants soient très faibles.

Nous réalisons donc ainsi un véritable *transformateur* transformant l'énergie à basse tension et grande intensité en énergie à haute tension et faible intensité.

Mais il faut remarquer que nous pouvons faire le contraire. Rien ne s'oppose, en effet, à ce que nous inversions les rôles de nos deux circuits : si nous alimentons le circuit à fil fin et long avec du courant variable à haute tension, nous recueillerons dans le circuit court à gros fil du courant de basse tension, mais de grande intensité. Ces deux modes de transformation sont l'un et l'autre d'une utilité extrême dans les installations à courant alternatif dont nous dirons plus loin quelques mots. Le premier mode est exclusivement utilisé dans la bobine de Ruhmkorff.

CHAPITRE VINGT ET UNIÈME

BOBINE DE RUHMKORFF

L'un des instruments qui ont le plus fait pour vulgariser l'électricité. A bien tout ce qu'il faut en effet pour attirer les badauds, comme les lampions, le soir, attirent les papillons : nourrie de l'électricité discrète des piles, elle élabora la foudre dans ses flancs, la foudre pour de bon, cette fois, qui éclate en crépitements sonores et tue avec aisance tous les animaux qui se présentent, ces animaux fussent-ils des bœufs : je parle bien entendu ici de ces puissants instruments comme en montraient aux foules ébahies de l'Exposition nos habiles constructeurs, les Gaiffe, les Ducretet, d'où s'échappent en une gerbe ininterrompue des étincelles de 60 centimètres !

A maintenant d'autres cordes à son arc que de figurer dans les foires : chose curieuse, après avoir franchi sans une application vraiment intéressante la période cependant si féconde qui nous sépare de sa lointaine apparition — 1851 —, s'est trouvée dotée coup sur coup en ces dernières années de trois applications plus étonnantes, plus paradoxales les unes que les autres : courants de haute fréquence, radiographie, télégraphie sans fils.

La bobine de Ruhmkorff, entre autres choses intéressantes, valut à son auteur, du gouvernement français qui se piquait d'encourager la science et les savants, une récompense de 50.000 fr. Le gouvernement en eut pour son argent : l'invention de Ruhmkorff était du premier jour si bien au point que, chose étonnante en cette science changeante où le progrès du jour *tombe* celui de la veille, elle s'est conservée telle jusqu'à nos jours, sauf modifications de peu d'importance aux principales desquelles sont attachés les noms de nos compatriotes Fizeau et Foucault.

L'étude de la bobine de Ruhmkorff ne sera pas longue pour nous. Son fonctionnement est basé tout entier sur l'application textuelle des principes énoncés au cours de notre étude précédente sur l'induction mutuelle. Vous prévoyez d'après cela que si vous la démolissez, vous y trouverez :

Un noyau de fer, feuilleté pour éviter les courants de Foucault.

Un circuit inducteur gros et court, destiné à être traversé par un courant plus ou moins intense, suivant la puissance de l'instrument, émané d'une batterie de quelque piles ou accumulateurs.

Un circuit induit long et fin ; plusieurs dizaines de mille tours dans les gros représentants de l'espèce.

Un dispositif pour fermer le circuit inducteur et le rompre à intervalles très rapides : l'idéal serait que le courant primaire aie juste le temps d'arriver au régime permanent pour que les effets d'in-

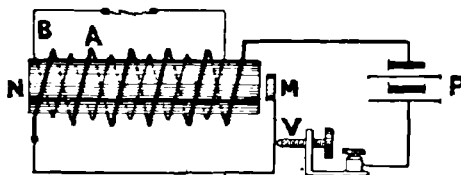


Fig. 141. — Schéma de la bobine de Ruhmkorff

duction présentent toute leur puissance, comme nous avons eu occasion de l'expliquer (page 247).

Interrupteur à trembleur. — Cette dernière partie de l'appareil seule nécessite une explication, et encore, celle-ci ne sera-t-elle pas longue, attendu que le mécanisme du dispositif interrupteur le plus répandu est tout simplement calqué sur celui de la vulgaire sonnerie électrique.

Dans le schéma fig. 141 on voit que le circuit primaire comporte en série un interrupteur dont les ruptures se font par contacts en platine entre la vis de réglage V et la tige du marteau M, ce dernier placé en regard et à proximité du faisceau de fils de fer vernis N constituant le noyau de l'appareil.

Le courant émis par la pile P vient-il à passer dans le primaire, le faisceau s'aimante et le marteau, attiré, rompt le contact.

L'attraction supprimée, le marteau retombe, rétablit le contact et ainsi de suite, le marteau prenant en résumé un mouvement vibratoire très rapide dont la fréquence considérable permet aux courants induits d'acquérir l'ampleur remarquable qui a décidé du succès de Ruhmkorff.

Théoriquement, cet instrument doit fournir des courants induits

allant alternativement dans un sens et dans l'autre puisque le circuit induit est nécessairement soumis à chaque émission à deux variations de flux égales et de sens contraires. Mais nous avons déjà fait remarquer que la disparition du champ inducteur étant beaucoup plus brusque que son établissement, la tension développée à la rupture est beaucoup plus grande: seule elle permet à l'étincelle ou à l'effluve de pouvoir vaincre la distance considérable qui en pratique sépare toujours les deux pôles du secondaire, de sorte que dans la réalité, les courants induits émis par la bobine sont toujours de même sens.

Il y a donc un pôle + et un pôle —.

Le dispositif précédent, dans sa simplicité primitive, présente des inconvénients. L'étincelle de rupture est trop considérable; sa conductibilité même empêche la résistance du primaire de devenir très

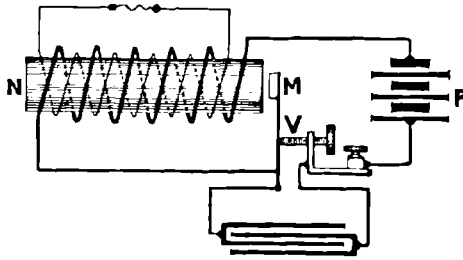


Fig. 142. — Adjonction d'un condensateur à l'interrupteur de la bobine Ruhmkorff.

grande, de sorte qu'une trop forte partie de l'énergie du champ magnétique vient s'y dépenser à chaque disparition, au détriment de l'énergie du courant induit. Nous avons déjà indiqué (page 235) des moyens dont l'emploi permettrait d'éviter cet inconvénient. Fizeau en a indiqué un meilleur qui consiste à shunter l'interrupteur par un petit condensateur — appareil dont nous reparlerons plus loin —. Au lieu de franchir l'air en une étincelle, l'extra-courant trouve dans le condensateur un chemin plus facile.

La résistance du circuit primaire peut alors devenir très grande aussitôt après la rupture, et la puissance de chaque courant induit s'en trouve considérablement accrue, puisque, ne pouvant plus se dépenser dans le primaire, toute l'énergie du champ est obligée de se porter dans ce courant induit..

Pour les bobines de grandes dimensions, ce mode d'interruption même présente encore des inconvénients. Pour ces grands appareils, Foucault a combiné un interrupteur spécial actionné par un circuit

distinct et constitué par un électro-aimant E agissant sur une armature F montée sur une lame vibrante dont on fait varier la période d'oscillation en élevant ou abaissant le contrepoids. L'interruption du primaire de la bobine se fait entre deux godets à mercure et deux tiges de platine T, S. Le mercure est recouvert d'une couche d'alcool qui a pour but de refroidir l'étincelle de rupture pour la faire éteindre plus vite.

Interrupteur Gaiffe. — Quand on peut disposer d'une canalisation fournissant le courant continu sous 100 ou 120 volts, on a intérêt à alimenter à son aide la bobine de Ruhmkorff, pour s'affranchir de la sujétion des piles et des accumulateurs.

C'est une disposition fréquemment employée aujourd'hui.

Sous la poussée énergique de cette diff. de pot. élevée, le courant d'excitation de la bobine arrive très rapidement à peu près à la

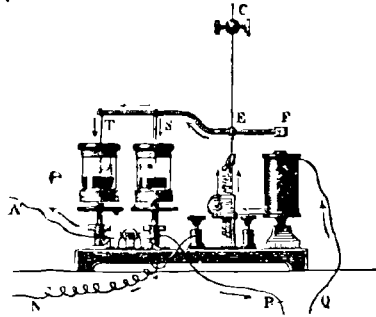


Fig. 143. — Interrupteur de Foucault

valeur qui correspond à la saturation magnétique du noyau : l'interrupteur de Foucault, malgré ses 10 ou 15 interruptions par seconde, n'est plus assez rapide pour empêcher le régime permanent d'être atteint et même de subsister — en pure perte, ne l'oublions pas — pendant presque tout le temps de passage du courant.

Il y a donc un grand intérêt à trouver un dispositif permettant d'augmenter la fréquence des interruptions : la tension des courants induits n'en souffrira pas si le courant a encore le temps — mais tout juste — d'arriver au régime permanent ; mais le nombre de ces courants induits, et partant la puissance moyenne de la bobine, augmentera dans une mesure considérable.

M. Gaiffe est arrivé à ce résultat en commandant un interrupteur à mercure semblable à celui de Foucault par un petit moteur électrique tournant à 3.000 tours par minute. C'est ce dispositif que représente la figure 144.

Avec ce dispositif, on passe donc des 10 ou 15 interruptions par seconde du Foucault à 50, et la longueur des étincelles n'en est pas affectée, ce qui suppose que le régime permanent est encore atteint à chaque établissement et que par suite les variations de flux, tout en étant plus rapides, conservent toute leur amplitude. Les décharges sont donc individuellement aussi puissantes, mais elles se suivent quatre fois plus rapidement, de sorte que la puissance de la bobine est multipliée par 4, la dépense d'énergie étant plutôt diminuée puisque le courant reste moins de temps au régime permanent. Même dans ces nouvelles conditions, d'ailleurs, on est encore très au-dessous de la limite à laquelle la longueur des étincelles commencerait à diminuer : et la bobine de Ruhmkorff a encore beaucoup à gagner.

Phénomène de Lagrange et Hoho. — Interrupteur de Wehnelt. — En dehors de ces dispositifs mécaniques, il existe un moyen fort curieux d'obtenir dans un circuit des interruptions se succédant avec une rapidité considérable.

Ouvrons ici une petite parenthèse :

Que diriez-vous d'un monsieur qui viendrait vous proposer sérieusement de faire rougir une barre de fer en la plongeant un instant dans un seau *plein d'eau froide* ?

Vous ne diriez peut-être rien, mais vous penseriez sûrement que quelque jour, pas lointain, l'asile de Charenton comptera un... habitué de plus.

Or, cher lecteur, c'est ce qui vous trompe ; grâce à l'électricité et à MM. Lagrange et Hoho, rien n'est plus simple.

Voyez plutôt vous-même !

Reliez, au moyen d'une électrode ou feuille de plomb de quelques centimètres carrés, l'eau acidulée d'un vase de verre au pôle + d'une batterie de quelques dizaines d'accumulateurs ou d'une dynamo. Le pôle —, lui, a été relié à un fil de platine ou même de cuivre, d'un millimètre de diamètre, plongeant de un centimètre ou deux dans le liquide. Faites passer le courant. Un abondant dégagement d'hydrogène s'effectue sur le fil et le recouvre d'une gaine peu conductrice dans laquelle se localise la presque totalité de la résistance du circuit : il se dégage par suite, dans cet étroit espace, une énorme quantité de chaleur, et l'électrolyse est accompagnée de crépitements, en même temps qu'apparaissent en différents endroits de la surface du fil des *points incandescents*.

Concentrons encore plus la chaleur dégagée en tirant peu à peu le fil hors du liquide : à un moment donné, les crépitements cessent.

Dans la gaine s'est développée une température assez élevée pour porter toute la masse gazeuse à l'incandescence : la portion immergée

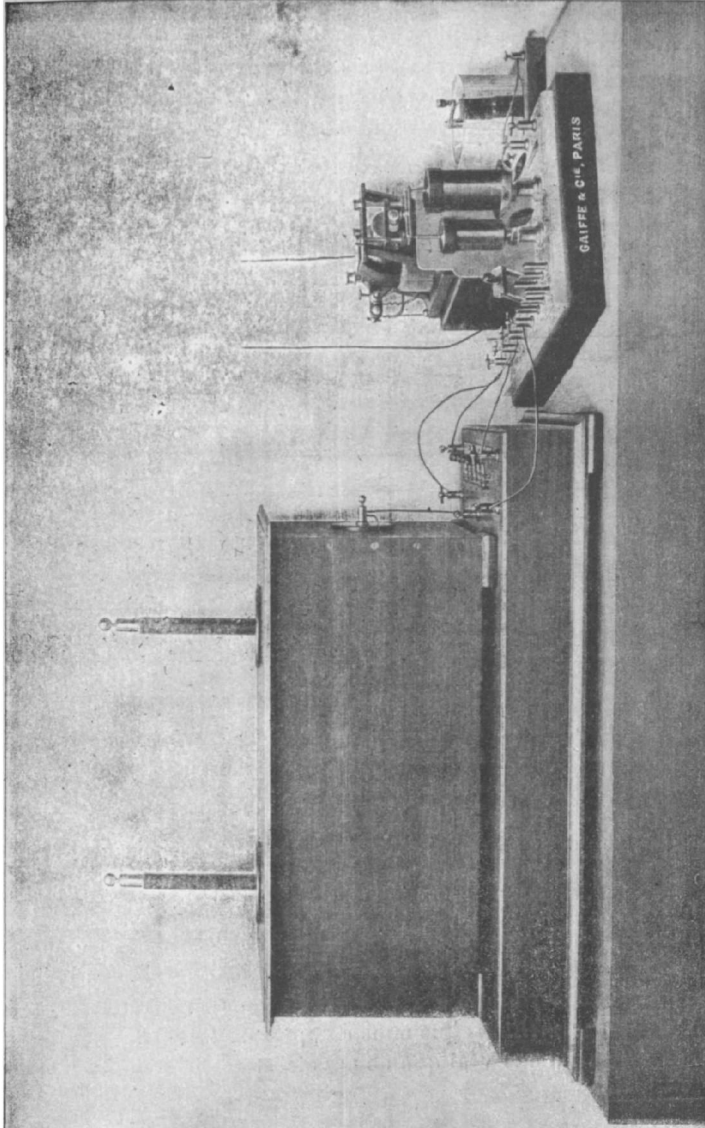


Fig. 144. — Bobine Ruhmkorff avec interrupteur Gaiffe

du fil, apparaît entourée d'une auréole lumineuse, d'un rose violacé, et ce fil lui-même, bien que plongé dans le liquide froid duquel le

sépare seulement une mince couche gazeuse, se trouve porté au *rouge éblouissant* !

Vous concevez maintenant qu'avec des moyens plus énergiques point n'est difficile à MM. Lagrange et Hocho de remplacer votre fil minuscule par des pièces plus respectables, et de se livrer avec maîtrise à des opérations qui les eussent envoyés au bûcher il n'y a pas plus de quelques siècles — comme le soudage, sous la surface de l'eau, de rails en acier placés bout à bout (1).

Si intéressant que soit l'objet de cette digression, on peut se demander à quel titre elle arrive à cette place, rappelant un peu des cheveux sur la soupe la discutable opportunité.

Voici :

Dans la première phase de l'expérience que nous venons d'effectuer, nous avons constaté un bruissement intense, rappelant

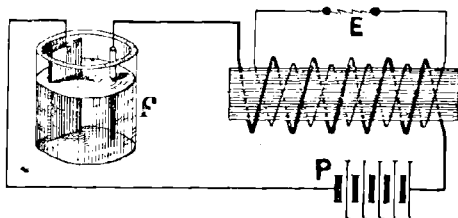


Fig. 145. — Schéma de l'application de l'interrupteur Wehnelt à la bobine de Ruhmkorff.

le bruit d'un fer rouge plongé dans l'eau. Un examen soigneux du phénomène nous montrerait que ce bruit est causé par des *interruptions* rapides de courant; bien qu'en réalité le phénomène soit très complexe, on peut admettre en gros que le passage du courant pendant un instant produit une gaine de vapeur qui, non conductrice, coupe le courant, d'où condensation de la gaine, rétablissement du courant, et ainsi de suite, à un taux qui varie suivant les cas et que *deux mille interruptions par seconde* ne sont pas pour effrayer. Mais vous l'êtes, vous, effrayé !

Peuh !

Nous avons beaucoup mieux que cela à vous montrer, et tout à l'heure, c'est par *millions* que nous compterons !

Il n'en est pas moins vrai que nous voici dotés pour la bobine de

(1) On devine que le pôle — est choisi pour y attacher les pièces travailler pour profiter de l'afflux d'hydrogène, qui empêche radicalement l'oxydation des pièces travaillées.

Ruhmkorff d'un interrupteur merveilleux. Il suffira (fig. 145) de placer en série avec le primaire de la bobine l'appareil si simple que nous manipulations tout à l'heure pour avoir, quant à la rapidité, un interrupteur à nul autre pareil.

C'est ce qu'a fait, en 1898, le Dr Wehnelt, c'est ce qu'ont fait après lui beaucoup d'autres expérimentateurs que les résultats, que la simplicité du dispositif avaient enthousiasmés.

Effectivement, quand une bobine est alimentée par un semblable interrupteur convenablement réglé, ce ne sont plus des étincelles isolées qui éclatent entre les extrémités du fil induit, c'est un véritable *torrent de flamme*. Si les conditions sont convenables, la longueur des étincelles elle-mêmes peut être considérablement augmentée, ce qui doit provenir surtout de l'échauffement de l'air traversé par une semblable décharge. Ainsi, dans des essais effectués par M. Hospitalier, une bobine de 6 cm d'étincelle, alimentée sous 100 volts par un interrupteur Wehnelt donnant 1.400 interruptions à la seconde a fourni un faisceau ininterrompu d'étincelles de la grosseur d'un crayon et de 15 à 18 centimètres de longueur !

Malheureusement cet appareil est capricieux.

Il s'arrête quelquefois sans qu'on sache pourquoi.

L'eau acidulée qu'il nécessite est tôt amenée à une ébullition qui ne laisse pas d'être désagréable, en même temps qu'elle compromet la régularité du fonctionnement.

L'appareil nécessite une batterie de force électromotrice élevée que l'on n'a pas toujours à sa disposition.

Bref, il semble qu'on se soit fait quelques illusions sur l'efficacité de cet interrupteur, et le bruit qu'avait fait son apparition commence à se calmer :

On peut le regretter.

TUBES DE GEISSLER

L'étincelle qui s'échappe en un flux ininterrompu des extrémités rapprochées du fil induit de la bobine de Ruhmkorff peut se transformer en un phénomène lumineux d'une douceur incomparable :

Il suffit pour cela de mettre les deux pôles en relation avec deux fils de platine soudés aux extrémités d'un tube de verre préalablement vidé à la machine pneumatique de la majeure partie de l'air ou des autres gaz qu'il renfermait. Dès que le trembleur de la bobine se met en branle, l'espace vide d'air compris entre les deux pôles se remplit d'une brillante lueur illuminant silencieusement toute la capacité du tube et dont la couleur dépend de la nature du gaz que

la décharge traverse. Violacée dans l'air, la lumière produite est verte dans l'acide carbonique, rouge dans l'hydrogène, pourpre dans l'azote.

Ces appareils sont les *tubes de Geissler* et l'expérience en question, si simple, puisqu'elle n'exige qu'une bobine de très faible puissance, est certainement l'une des plus belles de l'électricité.

La forme des tubes n'est pas sans influence sur l'apparence de ce magnifique phénomène. Présentent-ils une succession d'étranglements et de renflements, la lumière affecte des aspects très variés : pâle et diffuse dans les parties élargies, elle se surexcite, augmente d'inten-

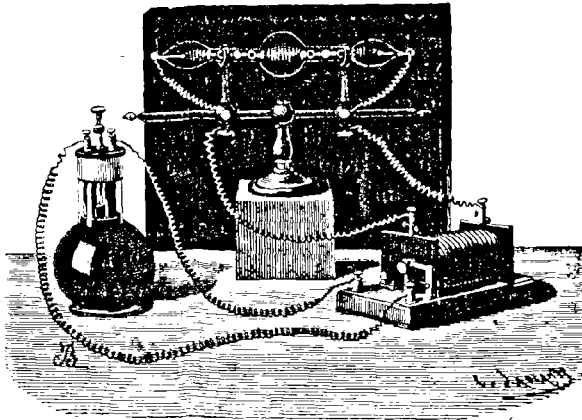


Fig. 146. — Tube de Geissler

ité dans les étroits défilés qu'elle est forcée de franchir ; en même temps apparaissent des stries obscures qui forment un contraste du plus joli effet avec l'éclat des parties voisines.

La lumière des tubes de Geissler est bien loin de ressembler à celle des sources ordinaires : elle est d'une douceur indescriptible, les yeux en supportent l'éclat sans fatigue et c'est avec surprise que si on vient à porter la main sur ces tubes enflammés, on les trouve froids : la lumière qu'ils émettent est en effet de la *lumière froide* ; ce fait pourra étonner les personnes qui, l'esprit faussé par nos procédés habituels d'éclairage, considèrent comme synonymes corps *lumineux* et corps *très chauds* ; il a été cependant à peu près mis hors de doute par les recherches de M. Warburg, qui attribuent à la température du gaz lumineux des limites comprises entre 21 et 130° ! On peut conclure de ces essais que le tube de Geissler émet peu de radiations calorifiques et beaucoup de radiations lumineuses : c'est

le « ver luisant » des électriciens et un avenir industriel important lui est peut-être réservé.

RAYONS CATHODIQUES

RAYONS DE ROENTGEN, RADIOGRAPHIE

L'émission de lumière qui caractérise les tubes de Geissler nécessite, pour se produire dans tout son éclat, que la raréfaction des gaz de l'ampoule ne soit pas poussée à l'extrême, ne dépasse pas un millimètre de mercure. Dans ces conditions, si le gaz renfermé dans le tube est de l'air, une colonne lumineuse rouge violacée, la *lumière positive*, part de l'électrode positive ou *anode* et se dirige vers l'électrode négative ou *cathode*, mais elle se termine avant de l'atteindre.

Quant à la cathode, elle est enveloppée plus ou moins d'une *gaine violette*.

A mesure qu'on augmente la raréfaction, l'aspect du phénomène se modifie: la *lumière positive* augmente de volume en devenant moins brillante, puis finit par disparaître lorsque le vide est très grand. La *gaine cathodique*, au contraire, augmente de volume, sa forme se modifie: elle devient seule visible quand le vide est poussé à un degré extrême, dans les parages du *millième de millimètre*.

De cette *gaine lumineuse* partent des rayons — les *rayons cathodiques* — qui jouissent de bien curieuses propriétés; d'abord, ils sont déviés par l'aimant; puis ils jouissent au plus haut point de la propriété d'exciter la phosphorescence: le diamant, le rubis, exposés à ces rayons, émettent une lumière brillante, vert bleuâtre pour le premier, rouge vif pour le second. Mais il n'est point nécessaire de recourir à des corps aussi rares; les substances les plus vulgaires donnent de très beaux effets: le verre ordinaire présente une belle fluorescence verte, visible dans toutes les ampoules à rayons cathodiques. La craie s'illumine d'une très belle lueur jaune orangé; nombre d'oxydes métalliques peuvent également être utilisés et, comme le dit l'un des plus savants observateurs des rayons cathodiques, M. P. Villard, la variété des teintes obtenues permet de réaliser de véritables *bouquets artificiels* qui se nuancent des plus vives couleurs sous le choc des rayons cathodiques (1).

Ce n'est pas sans raison que je parle de *choc*:

D'après M. Crookes, les rayons cathodiques ne seraient autre chose que la trajectoire de particules matérielles électrisées négati-

(1) Il serait bien intéressant de soumettre ces curieuses radiations à l'analyse spectroscopique.

vement et lancées par la cathode à une énorme vitesse : d'où l'expression de *bombardement moléculaire*. Ce bombardement moléculaire peut produire des effets calorifiques extraordinaires sur les surfaces qui y sont exposées : on le prouve en soumettant une petite lame de platine iridiée à l'action des rayons cathodiques, concentrés dans une direction convenable par l'emploi d'une cathode de forme appropriée.

Presque instantanément, sous la pluie des invisibles projectiles qu'il reçoit, le métal, *isolé dans l'espace*, est porté au rouge blanc !

Nos physiciens, qui ne doutent plus de rien, se sont amusés à mesurer la vitesse de ces projectiles : ils l'ont trouvée égale



Fig. 147. — Cliché radiographique communiqué par M. Radiguet : Curiosité physiologique : doigts doubles chez une jeune fille de douze ans.

à 30.000 kilomètres par seconde, une misère devant les 300.000 kilomètres des rayons lumineux ; ce qui n'empêche pas les particules cathodiques de déambuler *un million de fois* plus vite à peu près que nos express les plus rapides. Or, un tout petit calcul montre que si un corpuscule de 1 milligramme animé de cette vitesse, était arrêté brusquement, il produirait un bouleversement analogue à celui causé par dix trains express lancés à 100 kilomètres à l'heure et se précipitant des différents points de l'horizon les uns sur les autres !

Le moyen, après cela, de s'étonner des allures un peu bizarres des rayons cathodiques !

Tous les phénomènes que nous venons d'esquisser se passent dans

l'intérieur même du tube dans lequel se produisent les rayons cathodiques. Il est, en effet, très difficile de faire sortir ces rayons dans l'air, bien que M. Lénard et d'autres savants y soient parvenus. Lorsqu'ils rencontrent en effet un obstacle quelconque, et en particulier le verre de l'ampoule, ils subissent une transformation : l'obstacle rencontré devient la source de *rayons de Röntgen* ou *rayons X* qui, eux, peuvent circuler dans l'air où, comme les rayons lumineux, ils se propagent en ligne droite.

Ces rayons X excitent la fluorescence de beaucoup de corps, mais avec moins d'énergie que les rayons cathodiques : sous leur action, le sulfure de zinc, le platinocyanure de baryum, etc., deviennent vivement lumineux.

Dans le même ordre d'idées, ils impressionnent rapidement les plaques photographiques.

Or, non-seulement les rayons de Röntgen peuvent circuler dans l'air, mais ils traversent tous les corps. Toutefois, la *transparence* des différents corps à leur égard varie beaucoup. Très grande pour les corps légers comme la *chair*, le bois, le papier, l'aluminium, elle l'est beaucoup moins pour les corps durs et pesants tels que les *os*, les métaux.

L'ensemble de ces propriétés a permis une application bien intéressante. Si on reçoit sur un écran de platinocyanure de baryum un faisceau de rayons X émis par un tube de Crookes alimenté par une puissante bobine, après lui avoir fait traverser le bras ou le corps d'une personne interposée entre le tube et l'écran, les rayons de Röntgen, plus ou moins affaiblis suivant l'opacité plus ou moins grande des différentes parties du corps qu'ils ont traversées, viennent tomber sur l'écran, dont les différents points *s'illuminent* avec une intensité en rapport avec l'intensité des rayons qui les frappent : l'ombre, la silhouette du *squelette* du sujet apparaît ainsi sur l'écran à l'observateur, qui peut dès lors en constater à loisir les anomalies (fig. 147), fractures, présence de corps étrangers, etc.

Veut-on conserver une trace permanente de cet examen, il suffit de remplacer l'écran par une plaque photographique, qu'on soumettra ensuite aux opérations classiques de l'art photographique.

On conçoit quel progrès la technique chirurgicale et la médecine elle-même ont réalisé le jour où ces merveilleuses méthodes *radiographiques* sont entrées dans la pratique.

CHAPITRE VINGT-DEUXIÈME

UNE NOUVELLE GRANDEUR ÉLECTRIQUE

LA CAPACITÉ

Vous serez sans doute étonné de me voir abandonner si tôt le chapitre des applications de la bobine de Ruhmkorff, alors que tout à l'heure je vous faisais pressentir, outre la radiographie, d'autres applications sensationnelles de cet appareil, télégraphie sans fils et haute fréquence. N'en déplaise à votre amour-propre, il me faut bien vous dire que vous n'y comprendriez absolument rien si je vous les décrivais maintenant. Pour me permettre de vous donner une idée des phénomènes si intéressants qu'elles mettent en jeu, il me faut vous présenter d'abord une nouvelle grandeur électrique, la *capacité*, dont l'intervention se traduit par bien des bizarreries, par bien des faits en apparence abracadabrants et que, cependant, nous essaierons d'expliquer.

Pour nous faire une idée de cette nouvelle venue, nous allons commencer par la voir à l'œuvre.

Voyez ce flacon de verre *mince* (fig. 148) : sa surface externe, y compris le fond et jusqu'aux $\frac{2}{3}$ de la hauteur, est recouverte d'une feuille de papier d'étain. L'intérieur est rempli d'autres feuilles d'étain chiffonnées, mises en relation électrique avec l'extérieur par une tige métallique traversant le bouchon, recourbée en un crochet terminé par une boule.

Cet appareil, comme vous voyez, n'a aucun rapport avec ceux que nous avons disséqués jusqu'ici.

Approchez-le, en le tenant à la main par la feuille d'étain ou *armature* extérieure, d'une de ces machines statiques à frottement donnant d'inoffensives étincelles, longues et grêles. Votre chien, qui nourrit apparemment des sympathies

pour la physique, suit votre manège d'un œil interrogateur. Sous prétexte d'explications, penchez-vous vers lui et donnez-lui à flairer le crochet de la tige métallique : C'en est fini, jamais plus la pauvre bête ne remettra les... pattes au laboratoire!

C'est qu'au moment où, de confiance, il approchait son museau, une étincelle blanche, sonore, violente, a éclaté, le secouant dans tout son être d'une secousse énergique qui l'a chassé du laboratoire, hurlant à tous les vents. De votre côté, vous n'avez pas été sans recevoir un choc assez désagréable, mais vous l'avez subi de pied ferme, en vertu de ce fait qu'il n'est rien de tel, pour donner de l'héroïsme aux gens, que le plaisir de jouer un mauvais tour.

Votre appareil est une *bouteille de Leyde* ; le phénomène

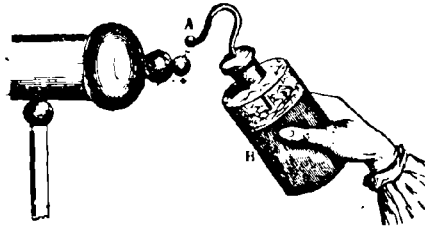


Fig. 148. — Charge de la bouteille de Leyde.

que vous avez constaté, que votre chien n'a pas digéré, est dû à la *capacité* de la bouteille et celle-ci n'est autre chose qu'un *condensateur*.

Voyons les choses un peu plus près... sans approcher par trop notre nez.

L'expérience que nous venons de réaliser nous montre deux choses :

1° A la faveur d'un *courant de charge* qui s'est manifesté lui aussi par des étincelles à l'approche de la machine, l'énergie électrique s'est accumulée d'une manière durable dans la bouteille, puisque nous pouvons en tirer une étincelle non seulement tout de suite après la charge, mais même plusieurs heures après si le temps est sec.

2° Les caractères de l'énergie fournie par la source ont changé : les étincelles de cette source étaient maigres, grêles

presque... aphones ; l'étincelle de *décharge* du condensateur est volumineuse, brillante, bruyante.

Notre bouteille se comporte donc comme un réservoir d'*électricité* emmagasinant pendant un certain temps l'énergie correspondant aux étincelles longues et grêles de la machine de charge, et restituant cette énergie d'un seul coup, lorsque les deux armatures sont réunies par un circuit conducteur (1).

Bien entendu, les deux armatures ne peuvent être portées qu'au potentiel de la source de charge : les étincelles de la bouteille de Leyde ne peuvent donc être plus longues que celle de la source ; au contraire : mais elles sont infiniment plus nourries.

La bouteille de Leyde n'est pas un condensateur bien fameux.

On la remplace souvent en pratique par une plaque mince A

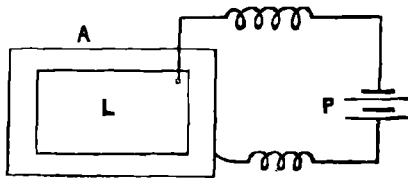


Fig. 149. — Condensateur à lame de verre.

de verre ou d'un autre isolant, d'un autre *diélectrique*, comme on dit aussi, mica, papier paraffiné, etc., recouvert sur chacune de ses faces d'une feuille de papier d'étain L (fig. 149).

Pour charger ce condensateur, on relie l'une des feuilles à un pôle de la source, l'autre au second pôle.

Comme la capacité de cet appareil est encore faible, on réunit en *quantité* un grand nombre d'éléments semblables en les empilant les uns sur les autres, ce qui permet de plus d'utiliser les deux faces de chaque feuille. Toutes les feuilles paires sont reliées à une borne commune, toutes les feuilles impaires à l'autre (fig. 150).

(1) Dans l'expérience précédente ce circuit était constitué par le corps du chien, le sol et votre propre corps ; circuit peu conducteur, suffisant cependant par suite de l'énorme tension agissante.

Lorsqu'on expérimente ces appareils, on constate que leur capacité — appréciée pour l'instant par la grandeur des effets produits — est d'autant plus grande que la *surface* d'électrodes est plus grande, d'où l'empilement d'un grand nombre de feuilles les unes sur les autres ; cette capacité est aussi

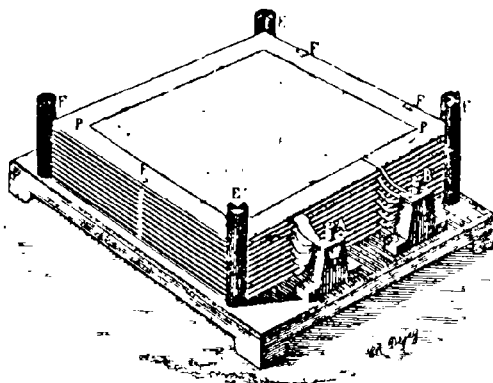


Fig. 150. — Condensateur à lames multiples

d'autant plus grande que l'*épaisseur* du diélectrique est moindre ; on constate enfin que la *nature* de l'isolant influe aussi énormément : toutes choses égales d'ailleurs, un condensateur en mica est beaucoup meilleur qu'un condensateur en verre.

Rien de tout cela n'a l'air de vous surprendre ! Je vois

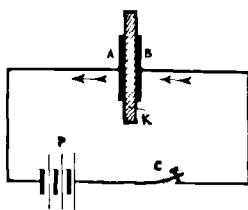


Fig. 151 — Passage du courant à travers un condensateur

bien le raisonnement que vous vous faites : avec les idées sur les isolants que vous vous êtes mises en tête, vous vous dites certainement que, puisque le circuit est interrompu entre A et B (f.151) par la couche mince d'isolant K, et que néanmoins

le courant de charge du condensateur passe tout de même, il faut que cet isolant soit en réalité un peu conducteur à la faveur de sa minceur : il vous semble tout naturel alors que moindre est l'épaisseur, plus grand est le courant de charge, et par suite la décharge : quant à l'influence de la nature du diélectrique, elle ne vous embarrasse pas davantage, les meilleurs diélectriques devant être, suivant vous, ceux qui sont les moins bons isolants.

Eh bien ! ce n'est pas cela, mais pas cela du tout ! Tous les bons diélectriques sont des *isolants parfaits*.

J'espère que vous voilà dérouté ?

Représentation hydraulique de la capacité. Véritable rôle des isolants. — Le moment est donc bien choisi

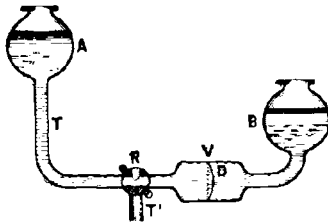


Fig. 152. — Représentation hydraulique de la capacité.

pour faire à nos comparaisons hydrauliques un nouvel appel : elles vont s'appliquer ici avec une exactitude remarquable qui nous permettra de faire le jour sur ces faits obscurs et d'éclairer d'une façon inattendue le véritable rôle de ce qu'on appelle à tort des *isolants* (1).

Imaginons (fig. 152) un vase V, ouvert à ses deux extrémités, entièrement *plein d'eau*, divisé en deux compartiments indépendants par un *diaphragme élastique* D qui l'obture entièrement. Ce vase sera pour nous l'équivalent hydraulique d'un condensateur.

(1) J'ai appliqué le mode de représentation ci-dessous à l'étude du courant continu et des courants alternatifs dans deux articles publiés par la *Lumière Electrique* en 1894.

Mettons-le par l'ouverture du robinet R, en relation avec un réservoir d'eau plus élevé, A : le diaphragme D se déforme et refoule vers B l'eau du compartiment d'arrière, il y a de A vers B production d'un *courant de charge*. Mais ce courant diffère de l'écoulement dans un simple tuyau en ce qu'il va en *diminuant* à mesure que la *tension* de la membrane augmente, et s'arrête lorsque cette tension fait équilibre à la pression exercée par l'eau de A : c'est l'image exacte du courant de charge d'un condensateur qui, d'abord très intense, s'annule bientôt comme si la résistance du circuit, d'abord très faible, devenait infinie : j'appelle en passant votre attention sur cette anomalie de la résistance d'un circuit qui, mal-

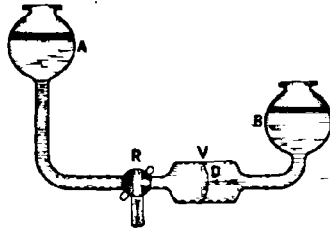


Fig. 153. — Si, lorsque la membrane est gonflée, on met R en communication avec un tube T', on a production d'un courant de décharge inverse du courant de charge.

gré l'interposition d'une matière *isolante*, est *très petite* au premier instant.

Dans notre comparaison hydraulique, qu'est devenue l'énergie mise en jeu par la descente du liquide de A vers V ? Cette énergie ne s'est pas dissipée, au moins totalement ; une partie s'est *emmagasinée* sous forme de tension de la membrane : cette énergie peut être restituée par la détente de la membrane provoquant un *courant de décharge* de sens inverse à celui qui a produit la charge lorsque, supprimant la communication avec A (Fig. 153), nous ouvrons par le robinet à *trois voies* R un chemin T' au liquide comprimé. C'est l'exacte représentation du courant de décharge d'un condensateur lorsque nous relions ses deux armatures par un circuit conducteur, auquel cas nous retrouvons dans l'étincelle et dans le courant de décharge toute l'énergie qui avait été *emmagasinée* lors de la charge.

Dans la représentation que nous venons d'imaginer, on voit que la charge du condensateur nous apparaît comme causée par un courant traversant d'un bout à l'autre tout le circuit, comme si ce circuit était entièrement métallique ; et il ne faut pas, comme on le fait trop souvent, assimiler le condensateur à un récipient *qui se remplit d'électricité* comme un vase se remplit d'eau : le vase V est plein d'eau après la charge comme avant : il y a eu simplement *déplacement* de liquide. Ce qui a varié, pendant la charge, c'est uniquement la *tension* de la membrane ; c'est à augmenter cette tension jusqu'à une certaine limite que s'est dépensée l'énergie développée par le courant liquide ; réciproquement, pendant la décharge, c'est cette membrane qui, revenant à l'état initial, a restitué l'énergie emmagasinée.

C'est donc elle qui, dans tout cela, joue le rôle capital.

Si notre comparaison est exacte, il doit en être de même dans notre condensateur pour l'équivalent de la membrane, c'est-à-dire pour le diélectrique, pour « l'isolant », qui *semble* barrer le chemin au courant électrique comme la membrane *semblait* le barrer au courant liquide.

Effectivement, ce rôle du diélectrique est *capital*.

Nous avons vu que sa nature influe beaucoup sur la capacité du condensateur : au contraire, on constate aisément par l'expérience que la *nature des électrodes* métalliques de ce condensateur n'*influe* absolument *pas*. On donne en pratique la préférence à l'étain parce qu'il peut se laminer en feuilles plus minces et tient moins de place : voilà tout.

L'expérience classique de la bouteille de Leyde à armatures mobiles (fig. 154) vient nous fournir encore des renseignements précieux.

Cet appareil se compose de trois parties, A, B, C, indépendantes les unes des autres et qui, réunies, donnent l'ensemble de gauche de la figure, lequel peut se charger et se décharger comme à l'ordinaire. Mais qu'au lieu de décharger la bouteille préalablement chargée, on la démonte, qu'on mette les armatures au contact l'une de l'autre, puis qu'on remonte la bouteille, *on obtiendra une étincelle* comme si on n'avait rien modifié : preuve irréfutable, n'est-ce pas, que

l'énergie n'était pas localisée sur les armatures, *mais dans le diélectrique*.

Autre analogie encore, si les précédentes ne vous suffisent pas, entre le diélectrique du condensateur et la membrane de la figure : si le condensateur est soumis à une différence de potentiel trop élevée, le diélectrique est *percé*, de même que la membrane *crève* lorsque la différence de niveau entre A et B devient trop grande.

De cette analogie d'effets, nous concluons à l'analogie des causes et nous dirons que l'accumulation d'énergie produite par le condensateur est obtenue grâce à *une modification dans*



Fig. 154. — Expérience de la bouteille de Leyde à armatures mobiles.

l'état moléculaire du diélectrique analogue à la variation de tension de la membrane : cette modification est produite par le courant de charge, qui est simplement le véhicule de l'énergie nécessaire pour opérer cette modification. La charge du condensateur correspond à une quantité d'électricité *déplacée* et le véritable rôle des isolants, *de l'air*, du verre, etc., c'est qu'ils sont perméables à l'électricité, mais d'une façon particulière, en donnant lieu à des *courants de déplacement* qui modifient leur état moléculaire.

Vous voyez apparaître par le bout de l'oreille la *télégraphie sans fils*.

Parlons un peu maintenant unités et équations. C'est l'inévitable formalité — vous le savez de reste! — qui accompagne la présentation de chaque grandeur électrique.

Reprenons notre analogie.

Soumettons le vase V à l'action d'une différence de niveau constante, mais employons successivement des membranes de natures, d'épaisseurs différentes ; à chaque membrane correspond le déplacement d'une certaine quantité de liquide, représentée par le volume de la poche formée par le diaphragme. La grandeur de ce déplacement dépend de la tension et d'un facteur que nous pourrions appeler la *capacité* de la membrane.

De même, la quantité Q d'électricité déplacée dans la charge d'un condensateur sous l'effet d'une tension de charge E est constante pour un condensateur donné et dépend de sa *capacité* C . D'autre part, elle est proportionnelle à la différence de potentiel agissante E , doublant, triplant avec elle. On a :

$$Q = C E \text{ (1) ou } C = \frac{Q}{E} \text{ (2)}$$

C'est-à-dire que la quantité d'électricité mise en jeu dans la charge d'un condensateur est égale au produit de la capacité par la diff. de pot. agissante.

L'unité de capacité est le **farad**, ainsi appelé en l'honneur du savant anglais Faraday, dont le nom est plus d'une fois revenu sous nos lèvres au cours de cette étude.

Qu'est-ce que le farad ? Pour le savoir, prenons $Q = 1$ coulomb, $E = 1$ volt. L'équation $C = \frac{Q}{E}$ devient $C = \frac{1}{1} = 1$ farad.

Le farad est donc la capacité d'un condensateur qui, chargé avec une diff. de pot. de 1 volt, *mettrait* en jeu une quantité d'électricité de 1 coulomb ; mettrait, avons-nous dit : c'est avec intention que nous employons le conditionnel, car un tel condensateur serait *énorme*. Aussi exprime-t-on les capacités des condensateurs industriels en *microfarads*.

Dans l'analogie hydraulique, nous nous rendons aisément compte que la capacité de la membrane est d'autant plus grande qu'elle est plus grande et plus mince : ceci s'applique mot pour mot aux condensateurs, dont la capacité augmente avec la surface et la minceur du diélectrique : ce dernier fait semble fournir un moyen fort économique d'augmenter tant qu'on veut la capacité des condensateurs en les constituant : avec des feuilles très minces de diélectrique. Moins il y en a plus cela fait de capacité, moins cela coûte : Malheureusement,

les grandes capacités à diélectrique trop mince sont frappées d'une *incapacité* rédhibitoire, elles *claquent* avec ensemble dès qu'on les soumet à la tension, de même qu'une membrane trop mince crève dès qu'on la soumet à la moindre pression.

Indépendamment des dimensions, la capacité d'un condensateur dépend enfin comme nous savons de la nature du diélectrique, dont chacun est caractérisé par une *capacité inductive spécifique*, qui, égale à 1 pour l'air, est de 1,9 pour le verre, de 2 pour la paraffine et atteint 5 avec le mica.

Passons à un autre exercice.

OSCILLATIONS ÉLECTRIQUES

Nous sommes, en effet, suffisamment armés maintenant pour aborder l'étude de phénomènes qui passent auprès du commun des mortels — disons même, du commun des électriciens — pour fort mystérieux.

Si, dans un circuit électrique, on rencontre à la fois deux des grandeurs que nous avons étudiées séparément jusqu'ici, self-induction et capacité, la combinaison de ces deux grandeurs peut produire ces effets particulièrement curieux connus sous le nom d'*oscillations électriques* ou *décharges oscillantes*.

L'importance de ces phénomènes est très grande. C'est grâce à eux que le professeur Hertz, dans de magistrales expériences, a pu donner les preuves les plus convaincantes de *l'identité de la lumière et de l'électricité*. C'est à leur aide qu'ont pu être tentées ces paradoxales expériences de télégraphie sans fils, qui, suivies d'abord avec un scepticisme un peu ironique par les télégraphistes de la vieille école, commencent à les intéresser singulièrement, grâce à la méritoire persévérance de l'Italien Marconi. C'est avec eux, enfin, que l'on produit ces courants de haute fréquence employés par Tesla dans des expériences retentissantes et hautement préconisés pour la pratique médicale par M. d'Arsonval.

Il est donc essentiel d'en bien saisir le mécanisme.

En mettant à profit les ressources de la haute analyse

mathématique, il est possible d'expliquer ces phénomènes et même de les prévoir : C'est ce qu'a fait, dès 1855, l'illustre lord Kelvin, en ce temps-là encore sir William Thomson. Mais ce procédé n'est pas à la portée de tout le monde et nous allons voir à le remplacer par autre chose de moins transcendant.

D'abord, en gros, que sont les phénomènes en question ?

Voici un condensateur C chargé préalablement à l'aide d'une diff. de pot. constante.

Fermons brusquement ce condensateur sur un circuit L possédant une self-induction convenable. S'il n'y avait pas de self-induction, il y aurait simplement, comme nous l'avons vu tout à l'heure, un courant de décharge allant de l'armature positive du condensateur à l'armature négative et dans lequel toute l'énergie emmagasinée serait dépensée en frottement, en chaleur.

Mais si la self-induction est suffisante, il y aura production d'un courant *pulsatoire* dont les oscillations pourront se succéder, vous m'entendez bien, à raison de dizaines de millions par seconde !

Avouez que ces courants de *haute fréquence* n'ont pas volé leur nom !

Pour comprendre ce phénomène bizarre, jetez un simple coup d'œil sur la figure 155. Vous y reconnaissez la figure que nous avons employée tout à l'heure pour expliquer les propriétés de la capacité, mais nous supposons que le tuyau T qui relie A à V est gros et très long et correspond par suite, vous le savez, à une *grande self-induction*. Nous allons donc ici faire intervenir *l'inertie*, que nous avons négligée (p. 226) dans notre comparaison.

Ouvrons brusquement R : le liquide passe de A en V en tendant la membrane jusqu'à ce que la tension de celle-ci fasse équilibre à la pression de A. Mais à ce moment, le liquide du tuyau étant animé d'une vitesse assez grande de A vers V *ne peut s'arrêter brusquement* : En vertu de son inertie, qui est grande, et de la vitesse acquise, il continue à pénétrer dans V, dont il tend par conséquent la membrane *plus* qu'il ne correspond à la pression de A. Lorsqu'enfin le mouvement s'arrête, la membrane *trop tendue* se détend,

refoule le liquide vers A, dépasse en sens contraire sa position d'équilibre par suite de l'inertie et ainsi de suite.

Il y a donc production d'*oscillations* du liquide dans le tube, oscillations qui se continuent avec des amplitudes graduellement décroissantes.

Telle est précisément l'image des *oscillations électriques*, à cela près qu'au lieu de quelques oscillations par seconde on peut, comme nous l'avons dit, en avoir des millions (1), Nos oscillations hydrauliques étaient provoquées, on s'en rend compte, par l'*échange continu* d'une même quantité d'énergie, de la membrane où elle était emmagasinée sous forme d'une distorsion des molécules, au liquide où elle s'emmagasinait sous forme de mouvement : De même, dans les oscillations électriques, l'énergie qui provoque les oscilla-

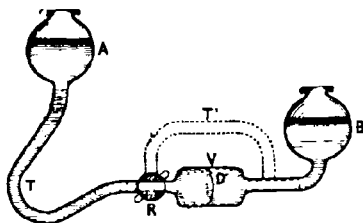


Fig. 155. — Lorsqu'on ouvre brusquement R, il se produit dans T un courant pulsatoire allant de A vers B, puis de B vers A; image des oscillations électriques.

tions est l'objet d'un perpétuel jeu de raquettes qui la renvoie du condensateur où elle était emmagasinée sous forme de déformation des molécules du diélectrique, à la self-induction où elle vient s'absorber sous forme de champ magnétique.

On peut même aller plus loin et à l'aide de cette comparaison hydraulique si simple, apprécier exactement l'influence

(1) Et à cela près aussi que ce que nous venons de voir est plutôt une *charge oscillante* de la membrane, tandis que le phénomène électrique habituel est la *décharge oscillante* : pour avoir l'analogie hydraulique aussi exacte que possible, il faut supposer que le vase à diaphragme, préalablement chargé par A, est brusquement déchargé sur un tuyau plein d'eau à *grande inertie* indiqué en pointillé sur la figure. Rien n'est changé aux raisonnements ci-dessus.

des divers éléments en jeu sur les caractères de la décharge oscillante des condensateurs.

Par exemple, si le diaphragme est grand, sa contre-pression s'accroît lentement : les oscillations sont lentes, mais de grande amplitude. Si de même dans un circuit électrique on *augmente* la capacité, on rend les oscillations plus *lentes* — tout est relatif ! — Si la masse de liquide est grande, lorsqu'elle est en mouvement dans une direction donnée, elle ne peut s'arrêter brusquement et les oscillations dans ce cas sont encore lentes. Il en est de même en électricité dans le cas d'une *grande* self-induction ; à plus forte raison les oscillations seront-elles *encore plus lentes* si la capacité et la self-induction sont grandes *toutes deux*. On pourra ainsi descendre jusqu'à cent oscillations et moins par seconde, tandis qu'en prenant self et capacité très petites, on est monté jusqu'à *cinquante milliards* : c'est tout ce qu'on a pu faire jusqu'ici et vous avouerez que c'est déjà bien joli !

On cherche cependant à aller énormément plus vite encore et voici pourquoi : si on pouvait avoir des oscillations *dix mille fois* plus rapides encore, ce serait les *ondes lumineuses* elles mêmes qu'on reproduirait !

D'autre part, la rapidité avec laquelle s'éteignent les oscillations du courant liquide dépend naturellement de l'influence des frottements, car nous avons vu que les oscillations sont entretenues par la même quantité d'énergie, qui se transmet à chaque pulsation de la membrane au liquide et inversement. Si les frottements sont peu importants, cet échange pourra s'effectuer très longtemps — ici encore, très longtemps est une façon de parler — sans diminution sensible ; s'ils sont considérables, l'énergie en jeu sera absorbée très vite et les oscillations s'affaibliront et disparaîtront presque instantanément. Si ces frottements y dépassent enfin une certaine limite, c'est-à-dire si le tuyau T devient trop étroit, toute l'énergie du courant de décharge sera absorbée d'un coup et les oscillations ne se produiront pas.

Pour des raisons absolument identiques, les oscillations électriques ne se produisent dans un circuit comportant de la self-induction et de la capacité que si la résistance ohmique du circuit ne dépasse pas une certaine valeur, et elles s'*amor-*

tissent d'autant moins vite que cette résistance est moins considérable. Si elle pouvait être nulle et si on ne soustrayait pas une partie de l'énergie mise en jeu par la haute fréquence pour l'utiliser dans les phénomènes qu'elle peut provoquer, les oscillations, une fois établies, persisteraient indéfiniment, car théoriquement, l'énergie absorbée à la charge d'un condensateur est entièrement restituée à la décharge, de même que celle absorbée à la création d'un champ magnétique est restituée lors de la disparition de ce champ.

Il est encore une condition nécessaire pour provoquer les oscillations électriques : c'est que la fermeture du circuit soit *instantanée*. L'analogie hydraulique rend encore compte de ce fait, car on voit que si l'on ouvrait très lentement le robinet R, le liquide s'écoulerait très doucement et ne pourrait plus intervenir par sa vitesse acquise. Il ne peut donc être question, pour provoquer les oscillations électriques, de manœuvrer mécaniquement ou à la main des interrupteurs car, électriquement parlant, cette manœuvre est infiniment lente. Ainsi se trouve justifié l'emploi général d'excitateurs à *étincelles* pour provoquer les oscillations, la production d'une étincelle correspondant, comme l'a remarqué M. Poincaré, à la manœuvre infiniment rapide d'un interrupteur.

RÉSUMÉ

Un condensateur est constitué par des lames isolantes sur les deux faces desquelles sont appliquées des feuilles ou *armatures* métalliques. Si on réunit les deux armatures d'un condensateur aux deux pôles d'une source d'électricité, il est traversé par un *courant de charge* qui a pour effet de modifier l'état moléculaire du *diélectrique*. Cette modification est durable : si, même après un certain temps, on vient à relier les deux armatures par un circuit conducteur, on a, sous forme d'une étincelle, un *courant de décharge* dans lequel la quantité d'énergie qui avait été cédée au diélectrique est tout entière restituée et après lequel le diélectrique se trouve ramené à son état initial. Cette expérience prouve que les isolants sont, eux aussi, perméables à l'électricité, mais dans certaines conditions seulement.

La *capacité* d'un condensateur s'apprécie à la quantité d'électricité mise en jeu pendant la charge, laquelle en effet est égale au produit de la diff. de pot. de charge par la capacité. Celle-ci s'exprime en *farads* et pratiquement, en microfarads. Elle est d'autant plus grande que la surface des armatures est plus grande, l'épaisseur des feuilles du diélectrique moindre et la *capacité inductive spécifique* plus élevée.

Si on décharge brusquement un condensateur chargé dans un circuit comportant de la self-inducton, l'ensemble du circuit est parcouru par un courant oscillatoire dont la fréquence est d'autant plus grande que la capacité et la self sont plus petites. Ce mouvement oscillatoire s'*amortit* d'autant plus vite que la résistance ohmique du circuit est plus grande : si cette résistance dépasse une certaine limite, les oscillations ne se produisent plus : on a un simple courant de décharge.

CHAPITRE VINGT-TROISIÈME

HAUTE FRÉQUENCE

PRODUCTION DE LA HAUTE FRÉQUENCE

Dispositif de Tesla. — Le secondaire d'une bobine de Ruhmkorff ou d'une machine à courants alternatifs (voir plus loin) est relié à un circuit comprenant un condensateur C, une self-induction L. Le secondaire de la bobine étant *très résistant*, il en est de même à plus

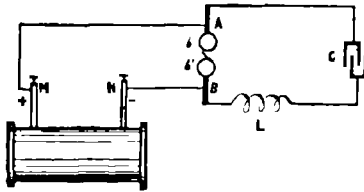


Fig. 156. — Production des hautes fréquences ; dispositif de Tesla.

forte raison de l'ensemble du circuit $M A C L B N$; or, nous savons que les oscillations électriques ne peuvent se produire dans un circuit *trop résistant* : le condensateur se charge donc progressivement, sans oscillations, lors du flux de courant émis par la bobine.

A mesure que la charge se complète, la différence de potentiel aux bornes A et B augmente. Elle atteint bientôt une valeur suffisante pour qu'une étincelle éclate entre les deux boules voisines b, b' : étincelle chaude, conductrice, qui substitue au circuit très résistant $M A C L B N$ le circuit *peu résistant* $b A C L B b'$. Nous savons que dans ces nouvelles conditions, l'énergie emmagasinée dans le diélectrique du condensateur va provoquer dans le circuit une décharge oscillante de haute fréquence à la faveur de laquelle l'étincelle, continuellement entretenue, maintiendra la conductibilité de l'intervalle bb' .

Cependant, les oscillations iront nécessairement en s'affaiblissant, en s'amortissant rapidement, et s'éteindront bientôt : mais un nouvel afflux de la bobine viendra alors recharger le condensateur, provoquer une nouvelle étincelle qui servira de point de départ à une nouvelle série d'oscillations, et ainsi de suite, de sorte que graphiquement, le phénomène se présentera sous l'aspect indiqué par la figure 157, à cela près que les séries successives seront bien plus éloignées les unes des autres qu'il n'est indiqué.

La rapidité avec laquelle se succéderont ces séries de décharges oscillantes ne dépend naturellement que de la rapidité des émissions de la source : elle peut d'ailleurs être assez grande, puisque nous

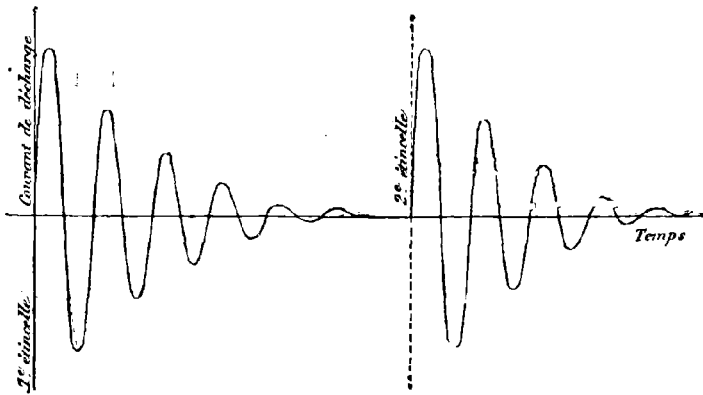


Fig. 157. — Représentation graphique des oscillations électriques.

avons vu que la bobine de Ruhmkorff peut fournir jusqu'à 50 émissions par seconde.

Quant à la fréquence des oscillations dont chacune des 50 étincelles par seconde provoque une série, nous savons qu'elle ne dépend *uniquement* que du produit de la capacité par la self : elle atteignait plusieurs centaines de mille par seconde dans les célèbres expériences de Tesla.

Dispositif d'Arsonval. — M. d'Arsonval, qui dès 1890 a attaché son nom à l'étude des courants de haute fréquence et en a fait à la médecine, entre autres, les applications les plus remarquables, a perfectionné beaucoup le dispositif précédent en le rendant susceptible d'un emploi plus sûr.

Nous verrons tout à l'heure qu'un des caractères les plus intéressants des courants de haute fréquence consiste dans leur innocuité absolue pour la vie humaine.

Mais, d'autre part, nous savons déjà que les condensateurs sont des appareils de complexion délicate, susceptibles de crever sous l'influence de la tension électrique. Qu'un semblable accident survienne à l'unique condensateur de Tesla, adieu les courants de haute fréquence, et adieu aussi la sécurité, car si on vient alors à toucher deux points du circuit C L B (fig. 156), on recevra directement la décharge de haute tension et de basse fréquence de la bobine: le malade, si c'est d'un malade qu'il s'agit, *risquera* fort d'être guéri du coup!

Pour éviter radicalement ce petit inconvénient, M. d'Arsonval a eu recours à un artifice bien simple.

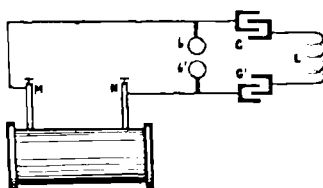


Fig. 158. — Production des hautes fréquences: dispositif de M. d'Arsonval.

Il divise en deux la capacité nécessaire et place la self-induction entre ces deux parties, réalisant ainsi le montage de la figure 158.

De cette manière, l'un des condensateurs venant à *claquer*, le circuit n'en restera pas moins, grâce à l'autre, parcouru par d'inoffensives décharges oscillantes dont la période sera seulement un peu allongée. On aura ainsi le loisir de remédier à l'*incident* sans qu'il en soit résulté d'*accident* fâcheux.

EFFETS DE LA HAUTE FRÉQUENCE

Pour qualifier les effets des courants de haute fréquence, un mot se présente sous ma plume dont j'ai déjà fait un usage abusif, celui de merveilleux.

Il a déjà été dit que les courants de haute fréquence présentent pour la vie humaine une innocuité absolue. Ce résultat bizarre était absolument impossible à prévoir, car lorsqu'on en est seulement aux courants présentant des interruptions peu fréquentes, on trouve précisément que la douleur causée à l'organisme humain par ces courants augmente rapidement avec le nombre, avec la fréquence des interruptions: c'est ce qui rend si douloureuse à supporter la décharge d'une bobine de Ruhmkorff de très médiocre puissance.

M. d'Arsonval a trouvé que cette aggravation des effets *continuait* et, toutes choses égales d'ailleurs, atteignait son maximum vers la fréquence de 2.500 par seconde.

Si on continue à faire croître la fréquence, l'action physiologique *diminue* pour s'*annuler* au voisinage de 10.000 périodes par seconde. C'est tout au plus si au delà de cette fréquence, des courants même très intenses provoquent une légère anesthésie des membres ou des organes soumis à leur action.

M. d'Arsonval a pu faire passer à travers son corps des courants énormes, 2 ou 3 ampères et plus, sans en ressentir autre chose qu'une légère sensation de chaleur aux points d'entrée et de sortie du courant, alors que des courants *dix fois moindres* eussent été *mortels* si la fréquence avait été abaissée à cent!

L'action physiologique n'est pas nulle cependant, mais elle est plus profonde: la circulation de ces courants dans le corps augmente énormément l'activité des échanges, peut doubler l'absorption de l'oxygène par le sang.

On devait donc s'attendre à voir les ralentis de la nutrition, diabétiques, arthritiques, rhumatisants, obèses, retirer de l'emploi rationnel de ces courants les résultats les plus heureux: ces résultats ont dépassé les espérances.

Les travaux qui se poursuivent de tous côtés sur cet intéressant sujet démontrent que le traitement de bien d'autres affections peut en bénéficier, que le terrible tueur d'hommes lui-même, le microbe de la tuberculose, perd du terrain sous les attaques répétées de la haute fréquence.

Dès à présent il est donc hors de doute que M. d'Arsonval a doté la thérapeutique d'un moyen d'action extrêmement puissant.

En raison de leurs variations incomparablement rapides, les courants à haute fréquence devaient se prêter à l'obtention d'effets d'induction très intenses.

C'est ce qui se produit en effet.

La figure 159 reproduit le dispositif adopté par M. d'Arsonval pour les applications médicales de la haute fréquence. On y voit figuré le solénoïde qui constitue la self-induction du circuit oscillant, self-induction qui doit être faible pour que les oscillations soient rapides, et que quelques tours de gros fil suffisent à constituer. Entourons ce solénoïde *d'une seule* spire de fil de cuivre *complètement isolée dans l'espace* et dont les extrémités aboutissent aux bornes d'une lampe à incandescence: la lampe s'allume! C'est que les variations de champ qui se produisent à l'intérieur du solénoïde, et par suite à

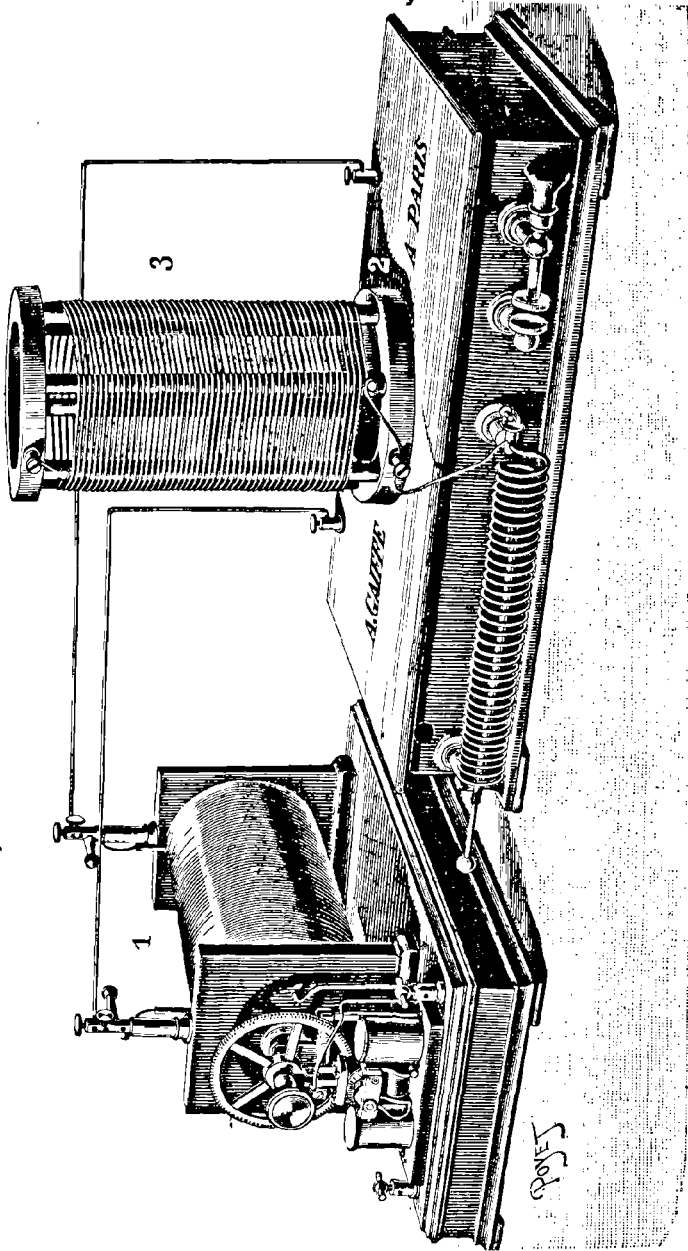


Fig. 159. — Dispositif de M. d'Arsonval pour la production des courants de haute fréquence.

l'intérieur de la spire, sont d'une rapidité si énorme que la f. é. m. induite dans celle-ci est suffisante pour alimenter la lampe.

Nous pouvons constater ici une chose fort curieuse.

Mettons un noyau de fer dans notre solénoïde : les effets constatés ne s'en augmentent pas comme vous auriez pu le supposer. Pour ces fréquences, en effet, le fer est comme les animaux : l'inertie de ses molécules est trop grande, elles semblent n'avoir pas le temps de vibrer à une pareille allure et ses propriétés magnétiques sont totalement annihilées !

Ces effets d'induction énormes sur des circuits très simples sont susceptibles de se manifester sous une forme particulièrement remarquable, en provoquant des courants induits très intenses dans l'organisme même des personnes, des malades qui y sont soumis, placés, pour ce faire, à l'intérieur des grands solénoïdes combinés pour cet usage. Les courants induits fabriqués dans le corps sont alors si intenses qu'ils peuvent déterminer l'incandescence d'une lampe de plusieurs bougies dont le patient tient dans la main les deux terminaux ! C'est la belle méthode de l'*auto-conduction*, à propos de laquelle le nom de M. d'Arsonval doit revenir une fois de plus.

Les tensions obtenues dans le montage du docteur d'Arsonval sont naturellement du même ordre que celle de la bobine génératrice, à-dire très élevées. Elles sont, de ce fait, susceptibles de produire de phénomènes d'une autre catégorie, effluves violettes intenses provoquant une rapide *ozonisation* de l'air ambiant, illumination de tubes vides d'air par simple approche d'un des pôles du résonateur, etc. Dans de mémorables expériences faites, en 1891, devant l'Association des ingénieurs électriciens des Etats-Unis, Tesla avait donné un éclat remarquable à ces phénomènes en employant, pour relever la tension de son générateur à haute fréquence, un circuit induit d'un assez grand nombre de spires. Dans ces conditions, les tubes de Geissler prenaient, par leur éclat, les proportions d'une véritable source de lumière, et le jeune ingénieur voyait dans ces superbes illuminations l'éclairage de l'avenir.

Dans ces expériences sur la haute fréquence, une chose paraît toujours fort surprenante aux non initiés, parce qu'elle paraît en contradiction complète avec les lois ordinaires de l'électricité : le contact avec *un seul pôle* suffit pour provoquer les effluves, l'illumination des tubes de Geissler, voire même l'allumage de lampes à incandescence. La contradiction est plus apparente que réelle. L'objet touché présente toujours, par rapport à l'autre pôle, une certaine *capacité* dont l'air interposé constitue le diélectrique, et grâce à l'énorme fréquence, cette capacité, si petite soit-elle, est suffi-

sante pour véhiculer le courant susceptible de produire de tels effets. La notion du circuit électrique n'en est donc pas ébranlée pour si peu, et il se trouve simplement que, par suite de la rapidité des oscillations, les corps isolants interposés entre les deux corps peuvent se présenter nettement sous cet aspect de corps *conducteurs* spéciaux que nous leur avons reconnu. La télégraphie sans fils, à laquelle nous allons en venir, ne sera que l'application poussée à l'extrême de ce même phénomène.

Citons encore un autre phénomène.

L'expérience qui le met en évidence consiste à brancher une lampe à incandescence sur *quelques spires* du solénoïde à haute fréquence : la lampe s'allume, et c'est bien cela qui est étonnant.

Car la résistance des quelques spires de gros fil en question n'est qu'une très petite fraction d'ohm ; les courants qui les traversent sont aussi assez faibles, soit quelques ampères au plus : par conséquent, leur passage, s'ils se comportaient comme des courants ordinaires, ne devrait provoquer entre les deux points de dérivation qu'une diff. de pot. de quelques millivolts. Pourtant, la lampe y trouve les 50 volts et plus qui lui sont nécessaires.

Ceci provient naturellement en grande partie de ce que la self-induction des spires, combinée à l'énorme rapidité des variations, augmente d'une façon démesurée leur résistance apparente ; mais un autre effet se superpose à celui-là. Aux fréquences élevées, la propagation des courants dans les conducteurs ne se fait plus qu'à *leur surface*, dans une couche d'autant plus mince que la fréquence est plus élevée, de sorte que la presque totalité du métal est inutilisée comme conducteur, et que par suite, non seulement la résistance apparente, mais la résistance ohmique elle-même se trouve énormément accrue.

Par exemple, j'ai effectué quelques mesures avec un courant de 1 million d'oscillations par seconde sur une barre de fer de 1 mètre de long et 4 cm. de diamètre. Cette barre présentait au courant une résistance apparente de 2,5 ohms, *vingt-cinq mille fois plus grande* que celle qu'elle aurait présentée au courant continu !

TÉLÉGRAPHIE SANS FILS

Rien ne satisfait les électriciens d'aujourd'hui.

L'électricité les a accoutumés à tant de tours de force que tous les jours ils lui demandent davantage.

Les premiers télégraphistes confiaient leurs messages à des circuits électriques complets, constitués par deux fils, l'un pour l'aller du courant, l'autre pour son retour. Mais on n'a pas tardé à s'apercevoir que la terre pouvait être employée pour remplir ce dernier rôle, que même à des milliers de kilomètres, le courant n'était pas embarrassé le moins du monde pour trouver son chemin à travers la terre et revenir fidèlement à son point de départ : le fil de retour a disparu de la télégraphie.

Aujourd'hui, on trouve que c'en est encore trop du fil d'aller; on trouve que ce fil unique est presque aussi ennuyeux à lui tout seul que les deux de... l'ancien régime, puisqu'il faut pour l'établissement de la ligne presque le même travail, que celle-ci est à la merci d'un coup de vent, d'un orage, d'un régiment ennemi.

Bref, ce survivant des procédés d'autrefois est un pelé, un galeux : on voudrait bien le supprimer.

On a déjà fait beaucoup de tentatives dans ce but, mais les plus nombreuses consistaient à perfectionner l'emploi de la terre comme conducteur et à la faire servir à la fois à l'aller et au retour du courant.

Rien de tout cela n'est fort sérieux.

La véritable télégraphie sans fils repose sur un principe bien différent, bien plus intéressant, celui de la propagation des ondes électriques à travers l'espace. Les mémorables expériences entreprises par Hertz pour démontrer l'identité de la lumière et de l'électricité en ont fourni la base essentielle.

Expériences de Hertz. — Le dispositif employé par Hertz pour lancer dans l'espace des ondes électriques en tout comparables aux ondes lumineuses est indiqué par la figure 160.

Les deux pôles d'une bobine de Ruhmkorff sont reliés à deux tiges métalliques T T', de 1 mètre de long, placées dans le prolongement l'une de l'autre, terminées aux extrémités en regard par deux boutons métalliques très voisins, aux extrémités opposées par deux sphères C C' de 15 cm. de diamètre.

Sous l'influence des émissions successives de la bobine, des étincelles éclatent entre les deux boutons et provoquent des oscillations électriques d'une énorme fréquence.

Pourquoi des oscillations?

A première vue, nous ne reconnaissons pas du tout le dispositif auquel nous les demandions tout-à-l'heure.

Pourtant, remarquez que les conducteurs T T' présentent comme toujours une certaine self-induction ; que les boules C C' constituent en réalité les armatures d'un condensateur dont le diélectrique n'est

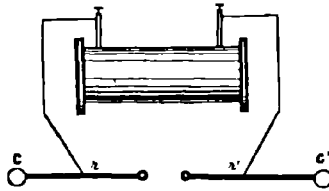


Fig. 160. — Expériences de Hertz

autre que *l'air qui les sépare*. Figurez par les signes conventionnels cette capacité et cette self-induction, et vous transposez le dispositif de Hertz sous la forme de la fig. 161, qui n'est, vous pouvez le vérifier, que la reproduction exacte du montage de Tesla : les effets produits sont donc les mêmes, à cela près que self-induction et capacité du circuit étant ici microscopiques, la rapidité des oscillations atteindra des valeurs énormes : c'est précisément ce que

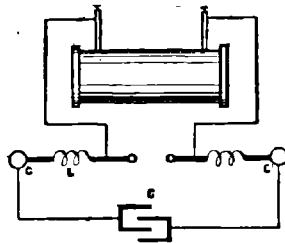


Fig. 161. — Mécanisme de la production des oscillations dans le montage de Hertz

désirait l'expérimentateur pour se rapprocher autant que possible des ondulations lumineuses.

De fait, Hertz atteignit du coup avec cet appareil une fréquence de quatre à cinq cents millions d'oscillations par seconde et ses successeurs, nous l'avons dit, ont réussi à porter ce chiffre déjà respectable à cinquante milliards. Or, pour que l'ébranlement de l'air devint *visible*, il faudrait monter à *cinq cents trillions* !

Si l'on a bien compris les explications précédentes, on voit que

dans le dispositif de Hertz, l'air est directement ébranlé par les oscillations électriques qui le traversent : ce n'est pas, comme on le croit trop souvent, les étincelles elles-mêmes qui l'ébranlent, elles ne sont que la cause indirecte du phénomène. Quant à ces ébranlements, qui se produisent dans l'air mais qui se produiraient tout aussi bien *dans le vide*, on admet qu'ils n'affectent pas spécialement l'air, mais ce fluide impondérable, l'*éther*, qui, suivant les physiiciens, pénétrerait, imbiberait jusqu'aux parties les plus intimes des corps.... Passons.

Cet ébranlement se propage au loin avec une vitesse que l'on a pu mesurer et qui est précisément égale à celle de la lumière.

Il est capable d'être révélé à distance de plusieurs manières.

Le procédé employé par Hertz, celui qui lui a permis de voir que les rayons électriques ainsi obtenus pouvaient comme les rayons lumineux se réfléchir, se réfracter, interférer entre eux, consiste à exposer à leur action un *résonateur*, petit appareil constitué simplement par un fil de cuivre replié dont les extrémités sont terminées par deux petites boules entre lesquelles jaillissent des étincelles provoquées par le choc des ondes électriques.

Ce mode d'investigation devient impuissant à quelques dizaines de mètres, et, réduite à cette maigre ressource, la télégraphie sans fils eût trainé une existence plutôt misérable.

Tubes de Branly. — Mais un autre procédé, d'une sensibilité incomparablement plus satisfaisante, a été imaginé et permet de déceler les ondulations à *cent kilomètres* de leur point d'émission. C'est le chiffre d'aujourd'hui, que celui de demain éclipsera sans doute

Ce procédé, mis en pratique par MM. Marconi, Popoff, Tissot et *tutti quanti*, est basé essentiellement sur les beaux travaux de notre compatriote, M. Branly.

M. Branly a constaté que des tubes pleins de limailles métalliques opposent au courant d'une pile une très grande résistance dans l'état ordinaire, mais perdent brusquement la presque totalité de leur résistance lorsque l'onde électrique hertzienne vient les frapper. L'effet produit est permanent et persiste après la disparition de l'onde jusqu'au moment où le tube, le *cohéreur*, reçoit un choc qui détruit la sorte d'orientation, de cohésion infligée aux particules métalliques par le passage de l'onde.

Si donc un système producteur d'oscillations de haute fréquence même très éloigné produit des ondes se propageant dans toutes les directions, un second système placé très loin et comportant un galvanomètre, une pile et un cohéreur, décèlera leur passage par une forte déviation du galvanomètre.

Un récepteur comme celui-là, d'ailleurs, ne serait pas suffisant pour les besoins de la télégraphie, car un message télégraphique comporte nécessairement une série assez longue d'émissions, dont le galvanomètre ne pourrait signaler que *la première* puisque, avons-nous dit, l'effet de l'onde électrique sur un cohéreur persiste indéfiniment.

M. Lodge a levé élégamment cette difficulté : le courant qui au moment du premier signal actionne le galvanomètre, remplacé en pratique par un récepteur Morse, actionne en même temps, par l'intermédiaire d'un électro, un petit marteau qui vient choquer le cohéreur, en fait disparaître la conductibilité, et le met en état de signaler le passage de l'onde suivante.

En résumé, un système complet de télégraphie sans fils comporte un dispositif à haute fréquence du genre de celui de Hertz, complété par une *antenne*, plaque métallique située à une hauteur croissant avec la distance de transmission, reliée à l'une des boules de l'excitateur et dont le rôle paraît encore assez mal expliqué ; ce circuit est alimenté par une bobine de Ruhmkorff dont le primaire comporte un manipulateur Morse et qui envoie dans l'espace à chaque abaissement de la clef un *flot* d'oscillations, dont la durée est précisément égale à celle de l'abaissement de la clef.

Quant au récepteur, c'est un simple cohéreur muni d'une antenne analogue à celle du poste transmetteur, et faisant partie d'un circuit comportant une pile et un récepteur Morse ordinaire.

Avec les perfectionnements journaliers indiqués par les essais, on a petit à petit amélioré les résultats, franchi des distances plus considérables. M. Marconi dans ses premiers essais, faisait péniblement franchir à ses signaux les 5 kilomètres du canal de Bristol. Aujourd'hui, certains navires de la flotte anglaise peuvent rester en relation avec la terre à 50 kilomètres de la côte et rentrer en communication avec elle deux heures avant d'arriver au port. D'autre part, M. Marconi considère comme dès maintenant assurée la transmission de messages à 200 kilomètres. Sans doute l'imagination des journalistes a été un peu vite quand elle a mis en avant la possibilité de la traversée tout entière de l'Atlantique ; du moins n'est-il déjà plus douteux que la télégraphie sans fils, qu'aucun obstacle n'arrête, pourra rendre en beaucoup de circonstances des services précieux, beaucoup plus précieux que la télégraphie optique, dont, à raison le plus petit brouillard interposé entre les deux stations.

Quant à Tesla, dont les relations avec Mars ont fait récemment si grand bruit, la science ne peut qu'enregistrer tristement cette nouvelle étape d'un physicien dont les premiers travaux avaient fait concevoir tant d'espoir.

COURANTS ALTERNATIFS

CHAPITRE VINGT-QUATRIÈME

COURANTS ALTERNATIFS SIMPLES

REPRÉSENTATION HYDRAULIQUE

Depuis pas mal de pages déjà, nous nageons dans les eaux troubles des courants variables. Il est temps maintenant — d'aucuns dirent même qu'il est... bientôt temps! — d'aborder une classe de ces courants qui présente en pratique une importance considérable. Je veux parler des *courants alternatifs*.

Que sont les courants alternatifs ?

Ce sont des courants provoqués par des diff. de pot., par des f. é. m. qui, au lieu d'être *constantes* comme celles produites par les piles, passent alternativement par des valeurs *positives*, puis *négatives*, et ainsi de suite.

Voilà sans doute une définition qui ne vous dit rien qui vaille ?

Appelons l'hydraulique à notre secours (fig. 162).

Reprenons notre ensemble de deux vases A et B réunis par un tuyau flexible T ; supposons que A, au lieu d'être fixe, soit suspendu par une ficelle à l'aide de laquelle vous allez alternativement l'élever au-dessus puis l'abaisser au-dessous de B et ainsi de suite. Quand A sera au-dessus de B, nous dirons que la différence de niveau agissante est *positive*, tandis qu'elle sera *négative* lorsque A sera au-dessous de B ; et nous expri-

merons ces variations en disant que la diff. de niveau de A à B est *alternative*.

Comme conséquence de ces variations de la différence de niveau, on voit que T est parcouru par un courant liquide qui, au lieu d'aller toujours dans le même sens, comme c'était le cas du courant liquide continu, va *alternativement* de A vers B puis de B vers A : ce courant liquide est donc *alternatif* comme la diff. de niveau qui le produit.

Diff. de niveau et courant liquide alternatifs, ainsi rendus visibles sont l'image des *diff. de pot. et des courants électriques alternatifs*; ceux-ci, d'ailleurs, ne sont pas tout à fait

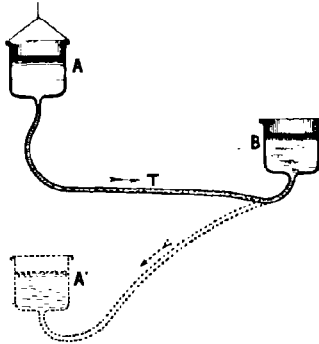


Fig. 162. — Représentation hydraulique du courant alternatif

des inconnus pour vous : les oscillations électriques qui vous étonnaient si fort et avec lesquelles maintenant vous êtes familiarisé, ne sont pas autre chose.

En pratique, toutefois, on réserve le nom de courants alternatifs à ceux qui sont produits par des diff. de pot. alternatives dont les variations suivent une loi que nous allons indiquer. Dans notre explication précédente, nous avons supposé que nous balançons le vase A à la main. Nous lui faisons prendre dans ces conditions un mouvement quelconque qui pouvait être, sans rime ni raison, lent à un moment, rapide à un autre, etc. Les courants alternatifs proprement dits ne s'accoutument pas de ces variations fantaisistes : ne sont jugés dignes de ce nom que ceux qui sont produits par une diff. de pot.

dont les variations suivent une loi constante, qui est celle des oscillations d'un pendule.

Mais tranquillisez-vous. Notre guide accoutumé ne nous abandonnera pas pour si peu.

Il nous est facile, en effet, de faire suivre cette même loi aux variations de la diff. de niveau de A par rapport à B. Il suffit de suspendre A à un ressort à boudin assez long et assez flexible pour que, en tirant sur ce ressort pour abaisser A, puis lâchant celui-ci, A prenne un mouvement vertical d'oscillation entre deux positions extrêmes A_1, A'_1 , telles que la plus grande diff. de niveau positive soit égale à la plus grande diff.

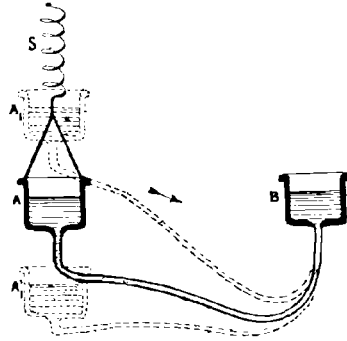


Fig. 163. — Représentation du courant alternatif ordinaire

de niveau négative. Nous supposons naturellement que le mouvement de notre système se continue indéfiniment, rien ne nous empêchant d'admettre que ce système reçoit périodiquement des impulsions destinées à empêcher son mouvement de s'affaiblir (1).

Dans ces conditions, nous réalisons une différence de niveau variable qui, d'abord nulle, prend des valeurs positives croissantes jusqu'à une certaine valeur maxima A_1 où le vase cesse de monter et à partir de laquelle elle diminue; qui ensuite s'annule en repassant par son point de départ, change de signe pour prendre des valeurs *négatives* croissantes

(1) Electriquement, ce sera la dynamo à courant alternatif, ou *alternateur*, qui se chargera de donner à la diff. de pot. alternative les impulsions périodiques.

jusqu'à un certain minimum précisément égal et de sens contraire au maximum précédent et correspondant à la position A', puis diminue et s'annule de nouveau en repassant à son point de départ, après avoir parcouru alors un cycle complet qu'on appelle une *période*.

Remarquons en passant que nous savons réaliser une différence de potentiel électrique suivant exactement le même cycle de variations que notre différence de niveau alternative : nous avons vu, en effet (pages 198 et 174), qu'une spire de fil tournant à vitesse constante autour de son axe dans un champ magnétique uniforme perpendiculaire à cet axe nous la fournit

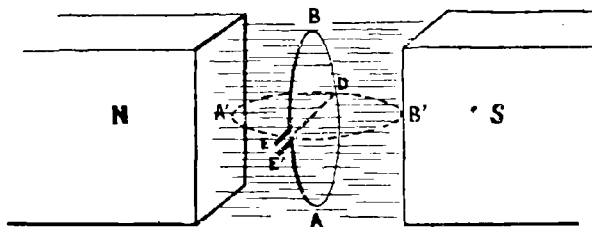


Fig. 164. — Production d'une f. é. m. alternative.

précisément (fig. 164). Faible diff. de pot. à la vérité, et que nous verrons tout à l'heure à amplifier, mais il nous suffit pour l'instant de savoir en réaliser une de cette nature.

F. É. M. ALTERNATIVE SUR RÉSISTANCE SANS SELF

Notre point de départ établi, étudions d'abord l'allure du courant liquide quand le tuyau qui réunit A et B est fin et long et correspond par suite, électriquement, à une grande résistance dépourvue de self-induction (fig. 163).

Supposons que A et B étant au même niveau, on élève A.

Par suite de la diff. de niveau croissante créée entre A et B, le liquide se met *aussitôt* en mouvement, puisque nous négligeons son inertie : il y a production dans T d'un courant allant vers B et qui augmente évidemment à chaque instant avec la différence de niveau.

Le maximum d'intensité du courant liquide correspond

nécessairement au moment où le vase arrive au haut de sa course, en A_1 .

Réciproquement, lorsque A redescend, la pression diminuant, le courant de A vers B va aussi en diminuant jusqu'au moment où, A étant revenu au niveau de B, il s'annule.

Pendant la seconde moitié de la période, partie pendant laquelle les diff. de niveau seront négatives puisque A sera au-dessous de B, les choses se passeront d'une manière analogue, le courant, toutefois, s'étant *inversé*, allant maintenant de B vers A et pouvant dès lors être considéré lui aussi comme *négatif* : comme lors de la première moitié de la période, ce courant négatif atteindra son maximum lorsque A sera en A_1' , au plus bas de sa course, et s'annulera lorsque A sera revenu à son point de départ.

Pas la moindre difficulté dans tout ceci.

Concluons :

Quand l'inertie est négligeable, l'intensité du courant liquide suit exactement les variations de la différence de niveau, est maxima ou minima, s'annule et change de sens en même temps qu'elle : la différence de niveau et le courant sont, comme on dit, en *concordance de phases*.

Le cas que nous venons d'étudier correspond électriquement au cas où une différence de potentiel alternative agit sur un circuit constitué uniquement par de la résistance sans self-induction ni capacité.

Nous en concluons par analogie, et c'est ainsi que les choses se passent en réalité, que dans ce cas l'intensité du courant suit exactement toutes les fluctuations de la diff. de pot., est en *concordance de phases* avec elle.

Nous voyons de plus que dans le phénomène hydraulique, comme nous supposons l'inertie entièrement négligeable, le courant liquide à un instant donné prend exactement la même valeur que si la différence de niveau agissant en ce moment se maintenait d'une façon permanente à cette valeur, était constante. Ceci signifie, électriquement parlant, d'abord que dans un tel circuit le courant prend immédiatement son régime normal, qui n'est précédé d'aucune période d'établissement de courant ; ensuite, que la loi de Ohm peut être appliquée ici, l'intensité du courant à chaque instant étant

égale au quotient de la différence de potentiel *agissant à cet instant* par la résistance ohmique du circuit.

Notez en passant ce petit succès de la loi de Ohm en matière de courants alternatifs.

Vous pourrez compter les autres!

MESURE DES COURANTS ALTERNATIFS

Ceci nous amène tout naturellement à ouvrir une parenthèse et à voir comment se présente la mesure des courants alternatifs.

Nous venons de remarquer qu'à la condition de considérer à un instant donné un circuit soumis à une diff. de pot. alternative, il est possible d'y voir une diff. de pot., et un courant se comportant l'un vis-à-vis de l'autre comme s'il s'agissait de courant continu. Dans la mesure de ces deux éléments instantanés, nous n'aurons donc aucune hésitation à employer comme pour le courant continu le *volt*, l'*ampère* et l'*ohm*; nous n'éprouverons pas plus de difficulté à admettre qu'à cet instant la puissance développée était de tant de *watts*, le nombre de watts étant précisément égal au produit des volts par les ampères à ce moment.

Donc, en ce qui concerne les valeurs *instantanées* du courant, rien de plus simple, même si ces éléments, à l'instant considéré, sont en tout ou en partie négatifs: on dira, par exemple, qu'à un moment donné la f. é. m. agissante est de — 30 volts, déterminant un courant de — 20 ampères (d'où $R = 1,5$ ohm).

Mais là où les choses s'embrouillent, c'est que, à part la résistance du circuit, qui n'a pas de raison de changer, ces volts et ces ampères subissent des variations perpétuelles, passant périodiquement par toutes les valeurs comprises entre la f. é. m. et le courant maxima, + 30 volts et + 20 ampères par exemple, et la f. é. m. et le courant minima, — 30 volts et — 20 ampères.

Ces variations continuelles des divers éléments des courants alternatifs peuvent, à bon droit, vous faire redouter une grande complexité dans leur mesure.

Heureusement, cette crainte n'est pas absolument justifiée,

car nous allons voir que les courants alternatifs peuvent produire *certaines* actions identiques à celles du courant continu ; ceci nous permettra, en effet, d'arriver à mesurer les courants alternatifs par *comparaison* avec les courants continus susceptibles de produire les mêmes effets.

Ainsi, lorsqu'un conducteur est parcouru par un courant, il s'échauffe, et peu lui importe pour cela le *sens* du courant. De même qu'une f. é. m. continue, une f. é. m. alternative peut donc provoquer un courant capable de porter à l'incandescence le filament d'une lampe si les *alternances* (c'est-à-dire les *lancées* de courant qui se succèdent dans un sens et dans l'autre à raison de *deux par période*), se succèdent assez vite pour que le filament, grâce à son inertie calorifique n'ait pas le temps de se refroidir beaucoup aux instants où le courant s'annule. La f. é. m. alternative sera équivalente à la f. é. m. continue si avec l'une ou avec l'autre le filament est poussé au même degré d'incandescence (1).

Diff. de pot. efficace. — Par exemple, l'application de ce procédé de comparaison montre qu'une f. é. m. alternative présentant une valeur maxima de 141 volts et toute la gamme des valeurs intermédiaires entre + 141 et - 141 en passant par 0 ne produit naturellement que les effets d'une diff. de pot. *continue* plus faible que 141 volts, soit de 100 volts seulement : on dit que la f. é. m. *efficace* de cette diff. de pot. alternative est de 100 volts.

Ce rapport de $\frac{141}{100} = 1,41$ entre la f. é. m. maxima et la f. é. m. efficace correspondante d'un courant alternatif n'est pas quelconque : il est absolument *constant* et a comme particularité d'être égal à $\sqrt{2}$. Il serait peut-être un peu téméraire de tenter ci d'expliquer pourquoi.

Courant efficace. — Des considérations analogues expliqueraient l'expression d'intensité *efficace* : ainsi, une intensité efficace de 1 ampère représente un courant alternatif qui, traversant une lampe à incandescence, y produirait le même

(1) Les explications qui seront données plus loin montrent que ceci n'est vrai qu'autant que la comparaison est effectuée à l'aide d'une résistance ne présentant pas de self-induction, ce qui est sensiblement le cas pour le filament des lampes à incandescence.

éclat qu'une intensité continue de 1 ampère. A ce courant *efficace* de 1 ampère correspond nécessairement une intensité *maxima* plus grande : comme tout à l'heure pour les f. é. m., le rapport entre l'intensité maxima et l'intensité efficace correspondante est encore constant et égal à $\sqrt{2}$ ou 1,41, de sorte qu'un courant alternatif possédant une intensité *efficace* de 10 ampères présente à chaque période des *maxima* de + 14,1 et — 14,1 ampères.

Ajoutons que quand on parle en pratique de volts et d'ampères alternatifs, c'est toujours de volts et d'ampères *efficaces* qu'il s'agit, à moins que le contraire ne soit explicitement spécifié.

Quant à la puissance, soyez tranquille, nous la retrouvons tout à l'heure. Bornons-nous, pour l'instant, à nous rappeler ce fait essentiel, que la puissance à *chaque instant* développée par un courant quelconque est égale au produit du courant à cet instant par la diff. de pot. correspondante.

F. É. M. ALTERNATIVE SUR SELF-INDUCTION

Nous avons supposé tout à l'heure que notre f. é. m. alternative avait trouvé pour s'exercer un circuit conducteur tout à fait exempt de self-induction : c'était, avouons-le, une supposition purement gratuite : qui dit courant dans un conducteur dit, en effet, champ magnétique créé par ce champ et par conséquent self-induction — sauf précautions spéciales. Du reste, l'analogie hydraulique correspondante était aussi un pur produit de notre imagination, car il est impossible que le liquide d'un tuyau ne présente pas une certaine inertie.

Ces invraisemblances, d'ailleurs, ne tiraient pas à conséquence, car si au lieu de supposer qu'il n'y a *pas du tout* de self-induction ou d'inertie, on suppose simplement qu'il n'y en a *pas beaucoup* par rapport aux frottements, les résultats restent les mêmes.

Mais admettons maintenant qu'il y en a *énormément*, et que les frottements sont au contraire très petits. Nous allons

voir quelles modifications profondes vont en résulter dans l'allure du courant

Un tel ensemble pourra se représenter par notre vase oscillant A, relié à B à l'aide d'un tuyau *gros et long* (fig. 165).

Prenons ce système au moment où le vase oscillant se met en route vers le haut à partir de sa position de repos A.

Si nous considérons une position quelconque de A pendant sa montée, par exemple A_2 , le liquide, en vertu de son inertie, *n'a pas encore eu le temps* de prendre la vitesse qui correspondrait à cette position si le vase y restait indéfiniment. Le courant est donc *en retard* sur la différence de

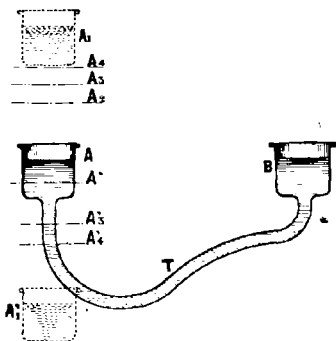


Fig. 165. — Représentation hydraulique d'une f. é. m. alternative agissant sur une self-induction.

niveau, et cela d'autant plus que la rapidité du mouvement de A est plus grande.

En particulier, lorsque A est arrivé au haut de sa course, en A_1 , le liquide n'a encore eu le temps d'acquérir que la vitesse qui correspondrait à une position constante *notablement inférieure*, A_3 par exemple.

Donc, lorsque le vase va redescendre, bien que la diff. de niveau agissante *diminue*, vous concevez très bien que *le courant n'en continuera pas moins à augmenter*, jusqu'à ce que le vase, en descendant, ait atteint une certaine position A_4 , comprise entre A_1 et A_3 , et à laquelle le courant possède justement la valeur correspondante à la diff. de niveau en ce point.

A partir de ce moment, le courant ne pourra plus que

diminuer, de sorte que A_4 correspond au maximum du courant et que ce maximum, au lieu de se produire en même temps que celui de la diff. de niveau, est *en retard*.

Poursuivons :

Le vase, continuant à descendre, atteint son niveau primitif A.

A ce moment, le liquide est encore animé d'un mouvement assez rapide de A vers B. Comme en vertu de son inertie il ne peut s'arrêter brusquement, et quoique la diff. de niveau devienne *négative*, il continue à aller de A vers B, restant *positif*, et ne s'annule pour changer de sens et devenir négatif à son tour qu'en A', après le passage en A.

Mais poursuivons encore :

Le vase arrive à la partie inférieure de sa course, en A_4 : en cet endroit, le courant liquide, qui ne se dirige de B vers A que depuis A', n'a pas eu le temps de prendre à ce moment une valeur aussi grande que le courant de A vers B pour la position opposée A_4 , lequel avait eu tout le temps du trajet de A à A_4 pour s'accroître. Ce courant pour la position A', n'a donc que la valeur qui correspondrait à la position supposée constante A', plus éloignée de la position extrême A' que A_3 ne l'était de A_4 . Et comme conséquence, lorsque le vase remonte, le courant de B vers A continue à *augmenter* jusqu'à une position A' comprise entre A' et A' mais plus éloignée de A' que A_4 ne l'était de A_4 . D'où l'on conclut que le second maximum du courant, maximum négatif, se produit encore après le maximum négatif de la diff. de pot., mais que le retard *s'est augmenté*.

On conçoit que si on continuait le même ennuyeux raisonnement — qui ne m'amuse pas plus que vous, je vous prie de le croire! — on arriverait à trouver que ce retard du courant sur la différence de niveau qui le produit, ce *décalage en arrière* comme on dit, va en augmentant pendant un certain nombre de périodes. On conçoit d'ailleurs qu'il sera d'autant plus grand que la rapidité du mouvement sera plus grande, et que l'inertie sera plus forte.

Toutefois, tout ce que ce retard peut faire, c'est d'atteindre *un quart de période*, auquel cas le courant *s'annule* lorsque la diff. de pot., est *maxima* et inversement :

Car il est évident que par exemple le courant vers B qui existe au moment où le vase passe en A *en descendant* ne peut plus s'augmenter après ce passage, puisque la diff. de pot., *négative* à partir de ce moment, agit sur lui à *contre-sens* : donc, la valeur du courant à ce moment ou bien est un maximum, ou bien a déjà commencé à diminuer, de sorte que forcément l'endroit du maximum du courant est situé dans le quart de période compris entre A_1 et A, et que le retard sur la position A du maximum de diff. de niveau est *au plus* d'un quart de période. On raisonnerait de la même façon à la remontée du vase A.

Notre raisonnement nous montre en outre ce fait intéressant que l'intensité du courant liquide, au lieu de prendre à chaque instant la valeur déterminée par la différence de niveau existant à cet instant, ne prend que la valeur qui correspond à un niveau moindre — comme par exemple A_3 quand le vase est en A_1 — et par suite possède toujours, de par l'inertie, une valeur *plus petite* ; *énormément plus petite* même si l'inertie est très grande et les oscillations de A très rapides.

L'inertie semble donc *augmenter la résistance* opposée aux déplacements du liquide, et cela, non seulement pour une période d'établissement très courte, comme nous avons vu que c'était le cas lorsqu'il s'agissait d'une diff. de niveau constante (voir page 231), mais d'une manière *permanente*.

Le raisonnement précédent était ennuyeux, certes, nous n'avons fait aucune difficulté pour l'avouer, mais convenez, à votre tour, que sans lui il vous serait difficile de deviner que l'adjonction de la self-induction dans un circuit a pour effet :

1° De faire précéder le régime normal du courant d'une *période d'établissement* dans laquelle ce régime normal s'établit petit à petit, ce qui n'était pas le cas avec le circuit sans self.

2° D'augmenter d'une manière permanente la *résistance apparente* du circuit, et cela d'autant plus que la self-induction et la fréquence sont plus grandes.

3° De supprimer la simultanéité entre le maxima et les annulations de la f. é. m. et du courant, en produisant un

décalage en arrière du courant par rapport à la f. é. m. : ce décalage, cette *différence de phases* est d'autant plus grande que la fréquence et la self-induction sont *plus grandes* et la résistance *plus faible*. Sa valeur limite est d'un *quart de période*, la f. é. m. étant alors maxima quand le courant est nul et inversement.

Le phénomène d'augmentation de la résistance apparente présente une importance dont on se fera une idée quand on saura qu'avec les courants alternatifs usuels, dont la fréquence est de 25 à 100 périodes par seconde — combien peu, cependant, par rapport aux hautes fréquences déjà étudiées! — le fil d'une bobine enroulée sur un noyau de fer peut présenter une résistance apparente 20, 50, 100 fois plus grande que sa résistance *ohmique*!

Ainsi, une bobine à noyau de fer feuilleté enroulée d'un fil de 1 ohm de résistance, placée sur une diff. de pot. alternative de 100 volts efficaces, pourra n'être traversée que par un courant efficace de 1 ampère. Qu'on vienne alors à retirer le noyau et que, par suite, on annule presque la self-induction, et l'intensité augmentera à tel point que le fil sera fondu!

Quant aux effets relatifs au *décalage*, ils ne présentent pas une moindre importance. Nous allons voir ce que devient, grâce à lui, la puissance absorbée dans le circuit.

PUISSANCE APPARENTE, PUISSANCE RÉELLE

Au point de vue de la puissance demandée au générateur, les circuits comportant de la self-induction et traversés par des courants alternatifs se comportent en effet de très singulière façon.

Nous avons déjà eu l'occasion d'insister sur cette règle fondamentale de l'électricité que quelle que soit l'allure du courant, la puissance mise en jeu à *un instant donné* dans un circuit est égale au produit de la diff. de pot. aux bornes à cet instant par le courant correspondant.

Mais notre étude des circuits alternatifs à self-induction vient de nous montrer que, suivant les cas, ce courant correspondant pouvait aussi bien être dirigé *en sens contraire* de la diff. de pot. agissante que dans le même sens.

Bien que d'après la loi en question la puissance qui apparaît dans ces deux cas soit la même si les diff. de pot. sont égales et les courants égaux, vous sentez bien cependant qu'il doit y avoir entre eux une différence.

Dans le cas du courant *de même sens* que la diff. de pot., il n'y a pas d'hésitation : l'exemple du courant continu montre qu'ici il s'agit d'une puissance qui doit être effectivement *développée* par le générateur pour entretenir le courant. Si, au contraire, le courant est de *sens contraire* à la diff. de pot., il développe sa puissance *contre* celle-ci : nous nous trouvons ici en présence d'un fait analogue à celui du courant de charge d'un accumulateur luttant *contre* la f. c. é. m. E' de celui-ci ; ou encore à celui du courant d'alimentation d'un moteur électrique, qui doit aussi vaincre la f. c. é. m. E' du moteur pour l'alimenter : dans un cas comme dans l'autre, le courant *cède* à l'accumulateur ou au moteur une puissance $E'I$.

Ici, c'est la même chose.

La puissance développée par le courant *contre* la diff. de pot. créée par la source chaque fois qu'il est de *sens contraire* à celle-ci est de la puissance *restituée* au générateur, tandis que la puissance développée par le courant lorsqu'il est de *même sens* que la diff. de pot. est de la puissance effectivement *produite* par le générateur.

Et comme puissance *restituée* ne va pas sans puissance *emmagasinée* préalablement, vous vous doutez bien que c'est la self-induction — n'oublions pas que nous sommes dans un circuit à grande self-induction — qui se charge de faire cet emmagasinement sous forme de champ magnétique dans les parties de la période où le courant est de même sens que la diff. de pot., et où de la puissance est donc réellement fournie par la source.

Un simple rappel de l'analyse que nous avons faite tout à l'heure du mouvement alternatif à grande inertie confirmera cette explication en faisant voir que le courant ne peut *augmenter* — dans un sens ou dans l'autre — que s'il est de *même sens* que la diff. de pot., ce qui est évident, car il ne pourrait augmenter si celle-ci agissait à *rebours* : le champ, qui se crée précisément pendant que le courant augmente, *ne peut donc se former* que pendant les périodes où de l'énergie est

demandée à la source, énergie dont il emmagasine une partie.

Au contraire, la même analyse montre bien que le courant ne peut être de *sens contraire* à la diff. de pot, c'est-à-dire ne peut restituer de l'énergie, que lorsqu'il *diminue*, ce qui est évident puisque la diff. de pot. agit alors sur lui à contre-sens : le champ disparaissant alors *restitue* son énergie sous forme d'une force contre-électromotrice de self-induction qui surmonte la f. é. m. du générateur (puisque le courant va à ce moment contre cette dernière) et vis-à-vis de laquelle le générateur travaille un instant comme *moteur*.

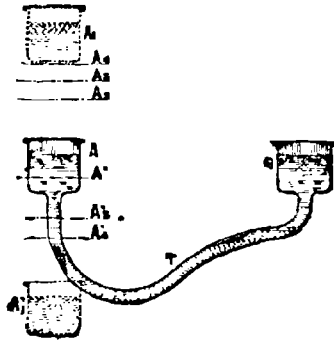


Fig. 166. — Mécanisme des absorptions et des restitutions de puissance.

Lorsqu'il n'y a que de la résistance sans self dans le circuit, il ne peut y avoir d'emmagasinement ni, par suite, de restitution : c'est pourquoi nous avons vu que dans ce cas le courant et la diff. de pot. sont toujours de *même sens*, (p. 292), montrant que toujours, de la puissance est *demandée* au générateur et disparaît à mesure sous forme de chaleur dans la résistance.

Lorsqu'au contraire la self est grande, la résistance nulle, nous avons vu qu'il y a un décalage en arrière d'un quart de période, le courant s'annulant quand la diff. de pot. est max. et inversement : ce courant reste donc de sens contraire à la diff. de pot. pendant tout le premier quart de période pour devenir de même sens pendant tout le second quart et ainsi de suite. Les périodes d'absorption et de restitution sont égales entre elles, la puissance restituée est égale à la puissance absorbée.

On arrive donc ici à cette conclusion paradoxale en apparence, que bien que le système puisse être alors soumis à des diff. de pot. considérables et à des courants intenses, il fonctionne avec une *puissance moyenne nulle* puisque tout ce qui est demandé au générateur à un instant, lui est intégralement rendu l'instant d'après. Et si étonnant qu'il paraisse, ce résultat n'en est pas moins en complet accord avec la logique, car la résistance du circuit étant supposée nulle, aucune énergie ne peut s'y dépenser en chaleur: il y a seulement, répétons-le, de l'énergie emmagasinée à la création du champ et restituée intégralement à sa disparition.

Si le circuit comporte à la fois résistance et self-induction, le décalage ne peut plus atteindre un quart de période, de sorte que le courant n'est plus opposé à la diff. de pot. *aussi longtemps* qu'il est de même sens: par suite, la puissance absorbée est *plus grande* que la puissance restituée. En effet, la puissance cédée par le générateur a ici à fournir à la fois ce qui est emmagasiné dans la self et ce qui disparaît en chaleur dans la résistance ohmique. Cette dernière partie est définitivement perdue au point de vue électrique, la première seule est restituée lorsque le courant diminue.

Ceci nous amène à faire une distinction absolument essentielle en matière de courants alternatifs: Il faut distinguer entre la *puissance apparente* fournie à un circuit par un alternateur et la *puissance réelle* fournie à ce circuit.

Par exemple, nous avons vu que dans un circuit exclusivement constitué par une faible self-induction, nous pouvons avoir à la fois grandes diff. de pot. efficaces et grands courants efficaces. Si nous nous avisons d'évaluer la puissance débitée par l'alternateur sur ce circuit en faisant le produit des indications du voltmètre à courant alternatif placé entre les bornes, qui indique les volts efficaces, et de l'ampèremètre placé dans le circuit, qui indique les ampères efficaces, nous trouverions que l'alternateur débite une puissance *énorme*.

Ceci, pourtant, ne serait qu'une apparence.

D'abord, par suite du décalage, une grande diff. de pot. ne peut exister *en même temps* qu'un grand courant dans un circuit à grande self et peu résistant puisque l'un s'annule quand l'autre est maximum: donc, même à un instant quelconque la

puissance ne peut être aussi grande qu'on pourrait le croire; mais surtout, nous savons que la puissance qui est demandée à certains moments est restituée à d'autres et que par conséquent la puissance moyenne dépensée par l'alternateur est très faible.

Conclusion :

Il est absolument faux d'évaluer la puissance fournie à un circuit ou débitée par un alternateur en faisant le produit de l'intensité efficace par la diff. de pot. efficace. On n'a ainsi que la *puissance apparente*. Pour avoir la *puissance réelle*, il faut tenir compte du décalage et multiplier le produit $E_{eff} \cdot I_{eff}$ par ce qu'on appelle le *facteur de puissance*, qui, égal à l'unité si le circuit n'est pas inductif (cas des résistances seules, décalage nul), *s'annule* lorsque le circuit ne contient que de la self-induction, ou, comme nous le verrons, que de la capacité (décalage, un quart de période).

Il n'y a, en résumé, qu'un seul cas où le produit $E_{eff} \cdot I_{eff}$ des indications du voltmètre à courant alternatif par l'ampèremètre à courant alternatif peut être légitimement considéré comme représentant la puissance réelle : c'est celui d'un générateur débitant sur un circuit non inductif, lampes à incandescence par exemple.

Dans tous les autres cas, la puissance ne peut se mesurer correctement qu'à l'aide d'instruments spéciaux qu'on appelle des *wattmètres*, à moins qu'on ne puisse connaître le facteur de puissance correspondant au circuit considéré, 0,80 ou 0,90 par ex., auquel cas on aura la puissance réelle en multipliant par ce facteur le produit $E_{eff} \cdot I_{eff}$.

F. E. M. ALTERNATIVE ET CAPACITÉ

Continuons notre étude des particularités du passage des courants alternatifs dans les circuits et venons-en à un cas qui par lui-même ne présente rien de bien intéressant, mais qui va nous mettre sur la voie de phénomènes qui ont dérouté les électriciens pendant longtemps.

Supposons que notre circuit soit constitué en tout et pour tout par un condensateur. Soumettons-le à l'action d'une f. é. m. alternative.

Que va-t-il se passer?

Nous nous sommes bien trouvés jusqu'ici de la représentation hydraulique de la capacité que nous avons imaginée. Conservons-la donc : le vase oscillatoire A est relié au vase V à membrane élastique D par un tuyau T assez gros, mais court, dont nous pourrions négliger tout à la fois les frottements et l'inertie (fig. 167).

Elevons d'abord simplement A à une certaine hauteur : nous savons que nous avons gonflement de la membrane jusqu'à un état d'équilibre correspondant à la hauteur de A et pour cela production d'un certain *courant* de charge qui diminue rapidement et s'annule, de sorte qu'avec une diff. de ni-

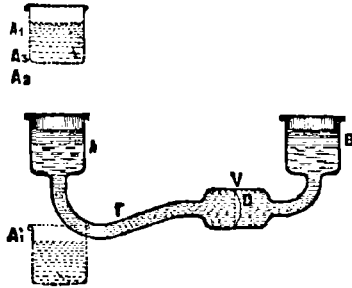


Fig. 167. — F. é. m. alternative sur capacité.

veau constante, il n'y a pas de courant *permanent*.

Mais faisons maintenant osciller A de A₁ à A'₁.

Il va se produire aux oscillations successives une série de courants de charge et de décharge c'est-à-dire, en réalité, un courant alternatif *permanent*.

Appliquant ces résultats aux condensateurs, nous comprenons que ces appareils ne sont pas perméables au courant continu, mais qu'ils se laissent au contraire facilement traverser par les courants alternatifs.

Mais quelles sont les particularités du courant qui traverse un condensateur?

Les deux vases étant au même niveau, élevons A. Par suite de la diff. de niveau croissante entre A et B, le liquide se met en mouvement de A vers B et détermine le gonflement progressif de la membrane : l'inertie étant nulle et les frottements

négligeables, cette tension suit presque exactement l'accroissement de la diff. de niveau, et l'*excès* de la pression exercée par A sur la contre-pression du diaphragme est toujours faible: comme c'est cet excès qui détermine seul le courant, puisqu'il n'y a pas d'inertie, celui-ci ne peut jamais acquérir une valeur bien considérable.

Lorsque A arrive vers la partie supérieure de sa course, son mouvement se ralentissant, la contre-pression tend à rattraper la diff. de niveau, et le courant diminue, pour s'annuler lorsque le vase arrive en A₁. Ainsi dans ce cas, qui n'est d'ailleurs que théorique, le courant s'*annule* précisément lorsque la diff. de niveau est *maxima*.

Mais notre vase descend.

La diff. de niveau diminuant, la contre-pression de la membrane l'emporte sur la pression exercée par A, de sorte que bien que la diff. de niveau soit toujours positive et même très voisine du maximum, le courant, positif jusque-là, *change de signe*, et devient *négatif*, puisqu'il va maintenant de B vers A.

Il continue ainsi jusqu'au point de départ A, où le mouvement de descente du vase est le plus rapide, puisque c'est le milieu de l'oscillation pendulaire — de même que l'endroit où la vitesse d'une balançoire est la plus grande est précisément le milieu de sa course — ; c'est donc à ce moment que la décompression de la membrane est le plus rapide et que le courant est maximum.

Le courant atteint donc son maximum de B vers A, son *maximum négatif*, quand la diff. de niveau n'en est encore qu'à s'*annuler* : il a encore sur elle une *différence de phases* de un quart de période et nous voyons bien qu'ici c'est de l'*avance*, puisque la diff. de niveau n'atteindra à son tour son maximum négatif que *bien après lui*, en A₁.

C'est donc le contraire de ce qui se passe avec la self-induction, où le courant est toujours *en retard*.

En continuant à suivre le mouvement de A, nous verrions aisément que cette avance d'un quart de période persiste indéfiniment.

Ceci est le cas théorique, qu'il était plus facile pour la

-compréhension d'étudier le premier; mais si au lieu d'un tube assez gros on a un tube très fin, le gonflement et le dégonflement de la membrane, gênés par l'insuffisance du débit, ne pourront plus s'effectuer aussi rapidement que le voudraient les variations de la diff. de niveau.

En particulier, lorsque A sera au sommet de sa course, en A_1 , la tension de la membrane ne sera que celle qui correspondrait à la position supposée permanente A_2 , cette position étant d'autant plus éloignée du sommet A_1 que les mouvements de A seront plus rapides. Donc, lorsque le vase redescendra de A_1 , la diff. de niveau n'en continuera pas moins pendant un certain temps à exercer une pression supérieure à la tension de la membrane; le courant liquide continuera donc à aller vers B en comprimant la membrane et ne s'annulera que pour une position A_3 intermédiaire entre A_1 et A_2 . Le courant ne s'annulera donc plus en A_1 comme tout à l'heure, mais un peu plus tard : son avance sur la diff. de niveau en sera réduite d'autant, et au lieu d'être d'un quart de période, sera d'*autant moindre* que la résistance du tuyau et la fréquence seront *plus grandes*.

Cet examen nous montre encore que si notre vase V, placé sur une diff. de niveau alternative, est siège d'un courant alternatif, ce courant est toutefois moins intense que si D était supprimé, parcequ'au lieu de la diff. de niveau tout entière il n'y a que l'excès de cette diff. de niveau sur la contre-pression de D à chaque instant qui détermine le courant. Quant au diaphragme D, il agit comme une résistance non plus infinie comme il le ferait pour une diff. de niveau continue, mais d'autant plus petite que la surface du diaphragme et sa minceur sont plus grandes, c'est-à-dire que la *capacité* est plus grande.

Vous comprendrez très bien enfin que plus les oscillations de A sont rapides (à amplitude égale), et plus intense est le courant parce que les gonflements et dégonflements du diaphragme ont lieu en un temps plus court, de sorte que cette *résistance apparente* offerte par la capacité C *diminue* avec la fréquence.

Traduction à l'usage des électriciens :

1° Lorsqu'un condensateur est placé en série avec une

résistance sur une f. é. m. alternative, le circuit est le siège d'un courant alternatif : le condensateur, au lieu de présenter une résistance *infinie* comme ce serait le cas avec le courant continu, présente une *résistance apparente* relativement faible, *d'autant plus faible* d'ailleurs que la capacité et la fréquence *sont plus grandes*.

2° La simultanéité entre les maxima et les annulations de la f. é. m. et du courant qui a lieu lorsque le circuit est constitué par une résistance parfaite, n'existe plus quand en série avec la résistance on place un condensateur. Le courant est alors *en avance* sur la f. é. m. et cette avance, ou *décalage*

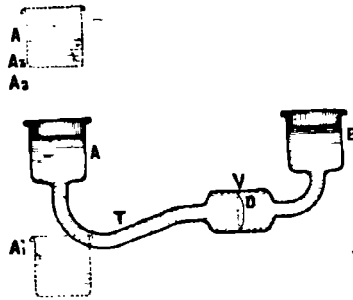


Fig. 168. — Mécanisme des absorptions et restitutions d'énergie.

en avant, est d'autant plus grande que la fréquence, la résistance et la capacité sont plus petites et a pour limite *un quart de période*.

Une observation encore.

Nous savons que l'énergie dépensée par la charge d'un condensateur est entièrement restituée à la décharge. Se composant en somme de charges et de décharges successives, le courant alternatif de capacité ne doit absorber aucune puissance.

Pourtant, nous y voyons appliquée une diff. de pot. qui peut être considérable et peut provoquer des courants intenses : le produit de $I \text{ eff.}$ par $E \text{ eff.}$ paraît donc correspondre à une puissance considérable fournie par l'alternateur.

Mais ce n'est évidemment encore ici qu'une puissance *apparente*.

Effectivement, nous voyons que pendant la montée de A à A_1 , le courant, allant vers B pour tendre la membrane (fig. 168)

est de même sens que la diff. de niveau et correspond à de la puissance *demandée* au générateur ; tandis que pendant la descente de A_1 à A , le courant, allant de B vers A à l'encontre de la diff. de niveau, correspond à de la puissance *restituée* par la détente de la membrane. Quand on néglige les frottements et l'inertie, ces deux effets sont égaux et de sens contraires de sorte que la puissance absorbée pendant un quart de période est restituée pendant le quart suivant et que par suite la puissance moyenne est *nulle*.

Remplacez une fois de plus membrane par diélectrique, diff. de niveau par diff. de pot. et vous concevrez que le courant de capacité ne nécessite pas pour son entretien plus de dépense d'énergie que le courant de self-induction.

Et les phénomènes abraçadabrants que je vous ai promis ? Patience, nous y arrivons !

F. E. M. ALTERNATIVE SUR SELF-INDUCTION ET CAPACITÉ EN SÉRIE

Nous savons maintenant qu'une self-induction soumise à une f. é. m. alternative est traversée par un courant *en retard* sur la f. é. m., tandis qu'une capacité est dans, le même cas, traversée par un courant *en avance* sur la f. é. m.

Nous avons aussi remarqué que pour une même self-induction, le courant *diminue* et *retarde* d'autant plus que les alternances sont plus rapides, tandis que c'est exactement le contraire pour la capacité. La self-induction et la capacité se présentent donc comme jouissant au point de vue du courant alternatif de propriétés exactement contraires, et nous sommes assez naturellement amenés à nous demander ce qui adviendra si, dans un seul circuit, nous combinons à la fois self-induction et capacité.

Constituons la représentation hydraulique d'un circuit comprenant capacité et self *en série*. Relions le vase A au vase à diaphragme V par un tuyau T : mais au lieu que ce tuyau soit court comme dans l'exemple de la page 304, admettons qu'il soit *gros* et *long* et que le liquide qu'il contient

présente par suite une inertie considérable, équivalant à une grande self-induction.

Supposons pour un instant que le vase A soit placé dans la position invariable représentée par la figure : ouvrons brusquement le robinet R. Nous savons, pour avoir étudié ce cas (p. 273), que le liquide du système prend un mouvement *oscillatoire* décroissant dont la rapidité dépend absolument des conditions particulières, longueur du tuyau, grosseur, grandeur du diaphragme, etc. En d'autres termes, à un ensemble A T V donné, correspond une *période propre d'oscillation* rigoureusement déterminée.

Imprimons à notre vase A un mouvement pendulaire de

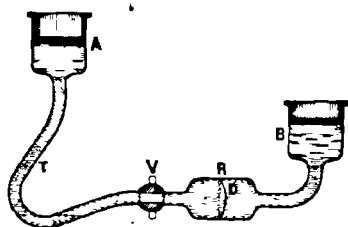


Fig. 169. — Explication du phénomène de résonance.

haut en bas en faisant en sorte que la période de ce mouvement soit précisément *égale* à la période propre de A T V. Cela signifie évidemment que le mouvement de A se produira *en concordance* avec les oscillations propres du système.

Alors, de même qu'une personne qui se balance augmente graduellement l'amplitude de ses oscillations en élevant et abaissant alternativement son corps *en concordance* avec le mouvement de la balançoire, de même l'amplitude du mouvement du liquide va augmenter graduellement, les oscillations vont s'amplifier de plus en plus, jusqu'à risquer de faire *crever le diaphragme* si la concordance entre le mouvement de haut en bas du vase A et le mouvement oscillatoire du système ATV est parfaite.

On dit alors qu'il y a *résonance*.

Si, au contraire, cette concordance n'existe pas, si le mouvement de haut en bas est ou plus lent ou plus rapide, les

deux mouvements se contrarient, et l'amplitude des oscillations reste très faible, de même qu'une personne qui chercherait à se balancer en élevant et abaissant son corps de n'importe quelle façon, n'y parviendrait jamais.

Dans le cas théorique où les frottements du liquide seraient nuls, l'amplitude des oscillations dues à la résonance augmenterait indéfiniment, ou plus exactement, augmenterait jusqu'au moment où le diaphragme crèverait !

Nous arrivons donc à ce résultat éminemment curieux que, pour une différence de niveau alternative, l'inertie *seule* se comporte comme une résistance au mouvement du liquide, le diaphragme *seul*, également comme une résistance, mais que placées *en série* dans les conditions convenables pour qu'il y ait résonance, ces deux grandeurs *se neutralisent*, l'ensemble correspondant à une résistance *nulle* puisque les courants deviennent très intenses.

Chose plus curieuse encore, la tension à laquelle est soumise la membrane est très considérable, puisque cette membrane peut crever alors que l'amplitude du mouvement de bas en haut peut être très faible : la résonance développe donc des pressions *infinitement plus considérables* que celle même qui agit.

Enfin, il est facile de voir ce qui advient du décalage du courant sur la diff. de niveau : par cela même que les oscillations se produisent *en concordance* avec le mouvement de haut en bas, ce décalage est *nul*, ce qui est logique, puisque le diaphragme produit un décalage en avant, l'inertie un décalage en arrière, et que ces deux grandeurs sont neutralisées l'une par l'autre au moment de la résonance.

Les mêmes phénomènes se produisent dans un circuit électrique (fig. 170).

Soit un ensemble constitué par une self-induction et une capacité supposées parfaites, c'est-à-dire dénuées de résistance ohmique. Ce circuit est lui aussi caractérisé par une certaine période d'oscillation qui nous est apparue lors de l'étude des oscillations électriques. Appliquons-lui une force électromotrice de période quelconque : le courant qui traversera le circuit sera très faible. Sans changer la grandeur de la diff. de pot. alternative, modifions sa *période* de manière

à la rapprocher de la période d'oscillation propre du système : petit à petit, le courant augmente jusqu'à devenir très *intense* au moment où la concordance exacte, où la *résonance* se produit. Et ceci ne peut nous étonner, car nous concevons maintenant que dans ces conditions, chaque fois qu'une oscillation se produit dans un sens, précisément à ce moment la f. é. m. agissante lui donne une *impulsion supplémentaire* qui augmente un peu l'amplitude de l'oscillation, laquelle arrive ainsi petit à petit à une valeur énorme.

En résumé, la résonance se produit lorsque la période propre d'oscillation d'un circuit comprenant self-induction et capacité est justement égale à la période de la f. é. m. alternative que l'on y applique.

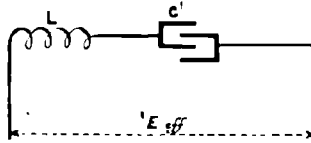


Fig. 170. — Production de la résonance dans un circuit électrique

A ce moment, la self-induction et la capacité sont exactement *neutralisées* l'une par l'autre, le courant n'est plus décalé sur la f. é. m., et si nous voulons mesurer la diff. de pot. aux bornes soit de la capacité, soit de la self, nous trouvons qu'elle est *énorme*, bien plus grande que la f. e. m. appliquée aux bornes de l'ensemble du circuit !

Ainsi, effectuant un jour une expérience à l'aide d'un courant alternatif de 100 volts, je développai à mon insu aux bornes d'un condensateur une tension énorme dont une bruyante étincelle m'avertit heureusement. Cette tension, mesurée après coup, fut trouvée égale à 4.000 volts ! Si, par mégarde, je m'étais avisé de toucher le condensateur en question, j'aurais évité à mes lecteurs actuels une indigestion de périodes, de décalages et d'alternances qui dépasse peut-être un peu trop les... bornes.

De même, on n'en est plus à compter le nombre des alternateurs qui ont sauté un beau jour parce que la combinaison de leur self-induction avec la capacité des canalisations

a été telle qu'il y a eu résonance et qu'il s'est développé une tension à laquelle l'isolement n'a pu résister.

Si le circuit expérimenté présente, outre la self-induction et la capacité, une certaine résistance, la résistance apparente totale du circuit se réduit, lorsqu'il y a résonance, à la *seule résistance ohmique* (1).

On voit par ce qui précède que si ennuyeuse, si dangereuse souvent, la résonance peut aussi rendre des services. Grâce à elle, si un circuit présente, par suite de la self-induction par exemple, une résistance apparente très grande au courant alternatif, on pourra forcer un courant intense à y passer néanmoins en mettant en série avec lui une capacité convenable pour qu'il y ait résonance avec la f. é. m. employée. On peut calculer aisément ces capacités et self-inductions équivalentes au moyen de formules assez simples, mais que nous ne pouvons donner ici. Il nous suffit d'avoir mis en évidence le mécanisme de ces phénomènes.

F. É. M. ALTERNATIVE SUR SELF-INDUCTION ET CAPACITÉ EN DÉRIVATION

Au lieu de disposer, comme dans le cas précédent, vase à diaphragme et tuyau à grande inertie à la suite, *en série*, rien ne nous empêche de les placer *en dérivation* comme l'indique la figure 171, et de faire agir sur cet ensemble notre diff. de niveau alternative.

Ce sera l'occasion pour nous de voir le courant alternatif se livrer à de nouvelles fantaisies.

Ici, chaque dérivation, subissant isolément l'action de la diff. de niveau, se comporte comme si elle était seule, et nous savons ce qui s'y passe pour l'avoir étudié précédemment.

Nous avons en particulier que dans la branche T à grande inertie, ce courant est *en retard* de un *quart* de période sur la

(1) Ceci n'est jamais rigoureusement vrai en pratique parce que la forme des courants alternatifs présente toujours quelques irrégularités et qu'il n'existe ni self-induction ni capacité parfaites. Cette réserve est applicable aux différentes conclusions que nous avons eu et aurons à tirer.

diff. de niveau agissante ; tandis que, dans la capacité, le courant est *en avance* de *un quart* de période sur cette même diff. de niveau, et par suite de une *demi-période* sur le courant de self.

Que signifie cette avance de une demi-période ? Cela signifie, par exemple, que lorsque le courant dans T présente son maximum de M vers N, le courant dans V présente au contraire son maximum de N vers M ; plus généralement, cela signifie qu'à chaque instant les courants dans les deux branches dérivées sont dirigés *en sens contraires*.

Par conséquent, le courant total résultant de la jonction des deux courants partiels dans les branches communes

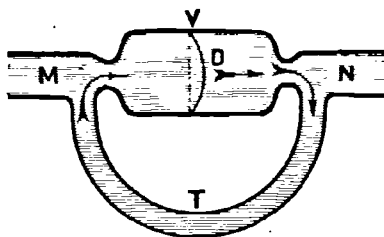


Fig. 171. — Représentation d'une f. é. m. alternative agissant sur capacité et self-induction en dérivation.

M et N sera égal non pas à leur *somme*, mais à leur *différence*.

De même et pour la même raison, si une capacité et une self sont placées en dérivation sur une f. é. m. alternative, le courant *total* débité par celle-ci ne sera égal qu'à la *différence* des courants de self et de capacité. Voilà déjà qui est curieux : et si vous voulez ahurir fortement un monsieur habitué aux allures bon enfant du courant continu, il vous suffira de lui montrer un ampèremètre M placé dans la branche commune indiquer (fig. 172) par exemple 20 ampères comme courant total résultant de la superposition d'un courant de 80 ampères, indiqué par l'ampèremètre N, avec un de 100 ampères indiqué par l'ampèremètre P !

Le courant alternatif a donc une manière bien à lui d'entendre l'addition, et comme nous ne pouvons l'envoyer à l'école, force est de nous habituer à ses façons.

Bien entendu, dans notre montage, le courant résultant est de même sens que le plus fort des deux courants partiels, c'est-à-dire que, par exemple, dans l'exemple précédent, le courant *total* de 20 ampères est du courant de self-induction, décalé en arrière de un quart de période.

Ici encore, le résultat de la dérivation de la self-induction par la capacité a encore été de *neutraliser* en partie les effets de la self-induction, puisque nous avons réduit le courant de self de 100 à 20 ampères ; mais, cette fois, la neutralisation s'est traduite par l'*augmentation* de la résistance apparente du circuit et non plus par sa *diminution*, comme dans le cas du montage en *série*.

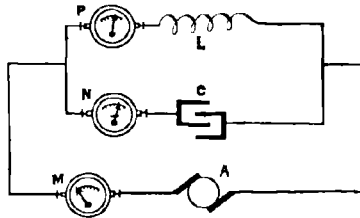


Fig. 172. — Une singularité des courants alternatifs

Notre amateur de courant continu était « estomaqué » tout à l'heure : nous avons en réserve de quoi le « tuer » complètement. Il n'y a pour cela qu'à manipuler un peu le noyau de la bobine de self pour augmenter légèrement sa self-induction et réduire le courant qui la traverse à 80 ampères, c'est-à-dire à la même valeur que le courant de capacité. Dans ces conditions, que devient le courant total ? Vous vous en doutez, puisque les deux courants sont à chaque instant égaux et de sens contraires. Et, stupide, le monsieur verra l'alternateur A débiter un courant *nul* sur deux circuits absorbant chacun 80 ampères !

C'est bien le diable si on le repince jamais à s'occuper de courants alternatifs !

CHAPITRE VINGT-CINQUIÈME

ALTERNATEURS ET TRANSFORMATEURS

Nous n'avons disposé jusqu'ici, comme source de courant alternatif, que de notre spire unique tournant dans un champ uniforme (fig. 164). C'est peu; même si cette spire tournait très rapidement, même si le champ était très intense, la f. é. m. et la puissance fournies ne seraient jamais que très faibles.

Comme dans le cas des machines à courant continu, on est donc conduit à réunir les effets de plusieurs spires. Si, par exemple, on emploie une bobine au lieu d'une spire, les f. é. m. développées dans chacune des spires de cette bobine seront tout naturellement couplées en tension. Comme, de plus, les variations de ces différentes f. é. m. se produisent *à la fois*, comme toutes ces f. é. m. sont en *concordance de phases*, la f. é. m. totale, celle qui existera entre les deux extrémités de la bobine, affectera les mêmes variations que chacune d'elles, c'est-à-dire qu'elle sera bien alternative, elle aussi.

Remarquez maintenant que la diff. de pot. ainsi créée et le courant qu'elle engendre sont bien plus faciles à collecter que le courant continu. Il n'y a plus besoin d'aller chercher sur l'enroulement les points constamment variables où se localise la diff. de pot. constante. Ici, c'est toujours et uniquement aux extrémités de notre bobine qu'il faut s'adresser. Plus besoin, par conséquent, de ce collecteur compliqué, dont l'entretien minutieux fait le désespoir des électriciens. Deux simples *bagues* isolées, placées sur l'axe de rotation, auxquelles viennent se souder les extrémités de la bobine et sur lesquelles frottent les balais collecteurs, et tout est dit. Par la même occasion, plus d'étincelles aux balais. Mais la nécessité apparaît d'une source spéciale pour la production du champ inducteur constant que le courant alternatif de la bobine ne saurait produire.

Munissons maintenant la bobine d'un noyau en fer pour augmenter l'intensité du flux magnétique à son intérieur, excitons notre champ à l'aide d'une source auxiliaire à courant continu, et voilà, constitué de toutes pièces, un alternateur susceptible de nous rendre quelques services.

Au point de vue industriel, cependant, le dispositif précédent ne serait pas encore suffisant parce qu'il ne permet que l'emploi d'une seule bobine.

On opère généralement alors d'une autre façon.

A l'aide d'un système inducteur comportant un nombre d'électros assez considérable disposés en deux couronnes placées en regard l'une de l'autre (dont une partie seulement représentée figure 173), on provoque entre les pôles en regard de ces électros des champs alternativement de *sens contraires*. Entre ces deux couronnes on fait tourner à grande vitesse un induit constitué par des bobines plates de fil se présentant par la tranche et en nombre égal

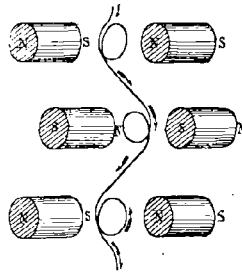


Fig. 173. — Vue d'une partie des couronnes inductrice et induite d'un alternateur Siemens.

à celui des paires de pôles. Si nous analysons ce qui se passe dans une de ces bobines, nous voyons qu'elle est successivement traversée par des flux de sens contraires et que par suite elle est le siège d'une f. é. m. alternative dont la période est déterminée par le temps mis par la bobine pour aller d'une certaine position à une autre où le flux qui la traverse se retrouve dans les mêmes conditions d'intensité et de sens.

Il y a donc moitié autant de périodes par tour que de *paires de pôles*, et la *fréquence* du courant s'obtient en multipliant le nombre de périodes par tour par le nombre de tours que l'induit effectue en une seconde (1).

Remarquons maintenant que puisque les bobines de l'induit sont

(1) La fréquence des courants industriels est généralement comprise entre 25 et 100 périodes par seconde.

en nombre égal à celui des paires de pôles, elles entreront ou sortiront toutes à la fois dans les champs des divers électros. Leurs f. é. m. subiront donc toutes aux mêmes moments les mêmes variations, à cela près que toutes les bobines *paires* seront soumises aux champs d'un certain sens tandis que toutes les bobines *impaires* seront soumises aux champs dirigés en sens contraire. Les f. é. m. paires seront donc exactement *inverses* des f. é. m. impaires, et pour coupler les f. é. m. de toutes les spires en tension, il faudra avoir soin de faire des enroulements inverses d'une bobine à l'autre comme le montre la figure 173.

Les extrémités du circuit induit ainsi formé arriveront comme tout à l'heure à deux bagues placées sur l'axe de l'induit et sur lesquelles frotteront des balais.

La machine que nous venons d'étudier est une machine Siemens.

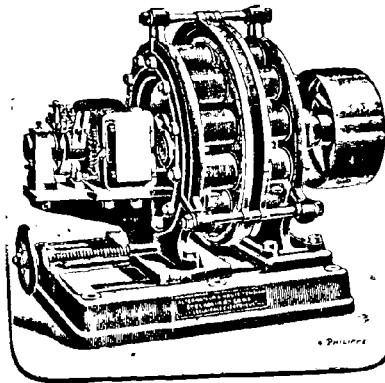


Fig. 174.— Alternateur Labour

La machine Labour, représentée fig. 174, constitue un type analogue.

Il existe encore beaucoup d'autres types d'alternateurs: nous ne les étudierons pas plus que nous ne nous sommes étendus sur les machines à courant continu.

Les uns comme les autres, ces alternateurs doivent être munis d'une *excitatrice* à courant continu généralement placée sur le même axe que l'induit de l'alternateur (fig. 174) et destinée à l'alimentation des électros.

Les alternateurs, considérés en tant que producteurs d'énergie électrique et comparés aux dynamos à courant continu, présentent leurs avantages et leurs inconvénients: ils ont l'avantage d'une

construction généralement simple, de l'absence du collecteur et de tous ses inconvénients; ils ont en revanche le grave défaut de nécessiter une excitatrice spéciale qui augmente le prix, la surveillance et l'entretien.

Somme toute, il est assez difficile, à ce seul point de vue, d'estimer de quel côté penche la balance.

Mais les courants alternatifs présentent un avantage énorme quand il s'agit de transporter l'énergie électrique à de très grandes distances, soit qu'on la produise à l'aide des chutes d'eau et qu'on doive dès lors l'envoyer à des centres d'utilisation quelquefois très éloignés, soit qu'on veuille distribuer l'énergie autour de soi dans une région très étendue, pour profiter des avantages de n'avoir pour cette région qu'une usine unique, plus économique d'installation et d'entretien, plus satisfaisante au point de vue du rendement des machines que plusieurs petites usines disséminées dans la région.

Or, nous avons déjà fait remarquer (page 219) que pour ces transports à grande distance, il faut envoyer l'énergie à travers les fils de la canalisation sous une diff. de pot. élevée, parce que la puissance perdue dans la canalisation de résistance R étant RI^2 , serait énorme dans le cas d'une transmission à faible tension, c'est-à-dire à grande intensité : sous peine de semer tout le long du chemin sous forme de chaleur la presque totalité de l'énergie transmise, il faudrait alors recourir à une canalisation énorme. Enorme et ruineux, c'est ici tout un.

Si, au lieu de recourir à cette solution inacceptable, nous augmentons la tension, voyez avec quelle facilité nous améliorons la situation :

Doublons E : comme nous ne nous proposons que de transporter une certaine puissance $P = EI$, il ne nous faut plus, à tension double, qu'une intensité deux fois moindre $\frac{I}{2}$. Or, la perte en ligne, qui était RI^2 , devient $R \times \left(\frac{I}{2}\right)^2 = \frac{RI^2}{4}$: en doublant la tension nous réduisons la perte au quart, ou, ce qui est la même chose, nous pouvons donner aux câbles de la canalisation une section quatre fois moindre sans augmenter la perte.

Triplons E , le courant est réduit à $\frac{I}{3}$, la perte de puissance à $R \left(\frac{I}{3}\right)^2 = \frac{RI^2}{9}$: en triplant la tension, nous réduisons la perte au neuvième : de même, en prenant une tension de $5E$, $10E$, $20E$, nous réduisons la perte que nous aurions eue avec E au $\frac{1}{25}$, au $\frac{1}{100}$, au $\frac{1}{400}$ de sa valeur, ou, ce qui revient au même, nous pouvons employer une canalisation énormément moins coûteuse sans augmenter les pertes.

Les pertes diminuent donc beaucoup plus vite que la tension n'augmente, en raison inverse du *carré* de celle-ci. C'est évidem-

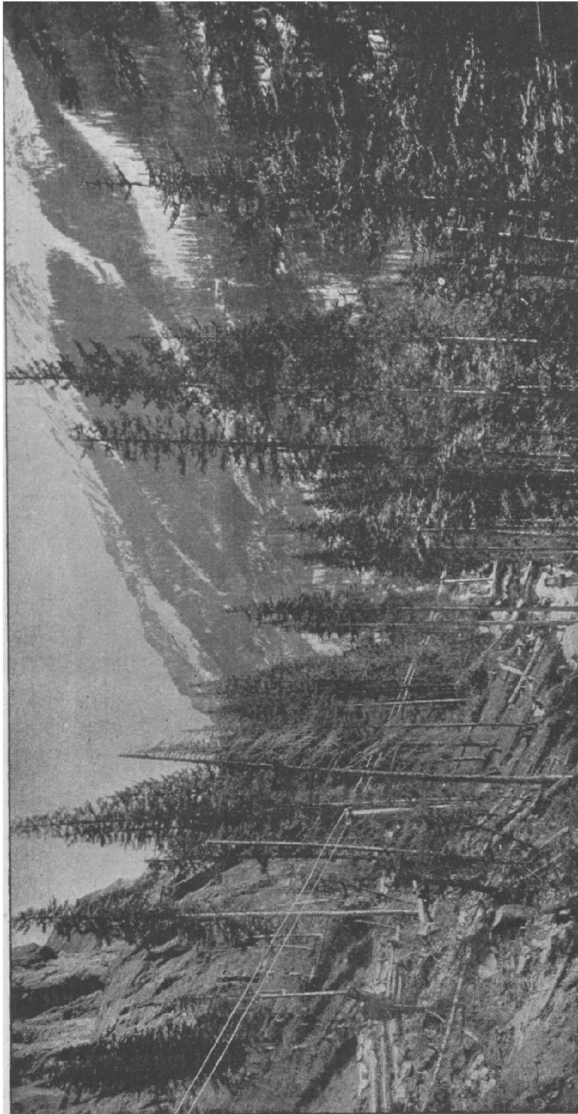


Fig. 475. — Ligne de transport de force de Folsom à Sacramento (Californie)

ment là un fait très alléchant ; il a conduit les électriciens à faire presque des imprudences et à monter pour le transport de l'énergie

à longue distance à des tensions de 20.000 et même de 30.000 volts, telles que les fils aériens qui transportent silencieusement ces courants archi-mortels à travers monts et vallées (fig. 175) apparaissent quelquefois dans la nuit enveloppés d'une fantastique effluve lumineuse !

Ayant réussi à discipliner des tensions aussi formidables, on conçoit que les électriciens ne reculent plus devant rien, qu'ils considèrent comme un problème enfantin de conduire à travers 2 ou 3 fils de quelques millimètres de diamètres des milliers de chevaux à des distances invraisemblables, cinquante, cent, deux cents kilomètres !

Mais pour transporter l'énergie sous de pareilles tensions, il s'agit d'abord de l'obtenir sous cette forme.

Les machines à courant continu ne s'y prêteraient pas ; ni leur enroulement, ni leur collecteur ne peuvent résister à des diff. de pot. un peu considérables, et un millier de volts représente à peu près la limite de leur savoir-faire. Donc, sauf couplage en tension de plusieurs machines, assez ennuyeux, on ne pourrait obtenir à leur aide du courant de haute tension qu'à la faveur d'une *transformation*.

Or, les courants continus ne se transforment pas facilement : tant s'en faut.

De plus, rendue à son point d'utilisation, l'énergie à haute tension est inutilisable directement. Il faut d'abord la ramener à une tension qui permette son emploi sans danger dans les lampes, moteurs, etc. L'énergie doit donc être ici soumise à une seconde transformation, inverse de la première et tout aussi difficile s'il s'agit de courant continu.

Au contraire du courant continu, le courant alternatif, lui, se prête admirablement à cette nécessité primordiale des transformations continues. Il plie l'échine avec docilité à tout ce qu'on exige de lui sur ce terrain-là, se mue de courant de basse tension en courant de haute tension avec une facilité qui n'a d'égale que sa bonne grâce à faire exactement le contraire.

Il suffit pour cela de l'envoyer dans des *transformateurs*, appareils absolument *inertes*, comportant en tout et pour tout un noyau de fer feuilleté et deux enroulements convenablement calculés.

La bobine de Ruhmkorff, que vous connaissez bien, est un appareil de ce genre. On l'emploie généralement pour transformer les courants continus — avec un rendement fort médiocre — en courant de haute tension qui n'est d'ailleurs plus du courant continu quoique étant, en pratique, toujours de même sens.

Mais rien n'empêche d'en faire — et même avec un rendement meilleur — un transformateur très efficace pour courants alternatifs.

Pour cette application, elle se simplifie même, car son accessoire le plus encombrant, l'interrupteur, doit être supprimé, les variations du courant alternatif même se chargeant de produire les variations de flux dans le noyau.

Mais il faut observer que les variations de flux ainsi réalisées sont tout à fait différentes de celles qui sont obtenues avec le courant continu et l'interrupteur.

Dans ce dernier cas, les variations du flux proviennent de ce que le champ passe continuellement d'une valeur très grande à une faible valeur (jamais nulle par suite du magnétisme rémanent). Ce flux est donc toujours *de même sens*.

Dans le cas du courant alternatif au contraire, les lancées de courant se succédant dans un sens et dans l'autre, il en est de même des variations de flux. Donc :

1° Le flux passe d'une valeur positive très grande à une valeur négative égale et de sens contraire, d'où à chaque fois une variation totale très étendue *comme amplitude*.

2° Le temps de la variation du flux maximum au flux minimum étant nécessairement ici *égal* à celui de la variation en sens contraire, nous ne devons plus observer entre les deux tensions directe et inverse la différence considérable que nous observions dans le cas du courant continu. Ici ces deux tensions maxima sont égales et de sens contraires, et le courant induit est *alternatif* comme celui qui lui a donné naissance : c'est donc bien là à un véritable transformateur, qui ne modifie que les facteurs du courant, pas leur *forme*, que nous avons affaire.

La bobine ainsi excitée serait donc impropre à la production des rayons X, puisque nous avons vu que ceux-ci exigent des décharges toujours de même sens. Mais elle convient encore fort bien à la production des hautes fréquences.

Le fonctionnement de la bobine de Ruhmkorff sur courants alternatifs présente d'ailleurs cette remarquable propriété, que la puissance qu'il faut lui fournir *se proportionne d'elle-même* au débit demandé au circuit secondaire :

Nous touchons là à la plus précieuse propriété des transformateurs à courants alternatifs.

Supposons en effet que ce circuit secondaire reste ouvert : aucun courant ne pouvant s'y développer, c'est comme s'il n'existait pas et tout se passe comme si le circuit primaire *était seul*. Or ce circuit primaire présente peu de résistance, puisqu'il est constitué par peu de tours de gros fil, mais possède une grande self-induction par suite du noyau de fer. Et lorsque nous avons étudié précédemment l'allure

du courant dans un pareil circuit (page 295), nous avons vu que l'énergie y est cédée à certains moments pour la création du champ, mais est restituée intégralement lors de la disparation de ce champ.

La puissance réelle demandée au générateur qui alimente notre bobine est donc dans ce cas à peu près nulle; elle ne deviendra considérable que lorsque nous utiliserons le secondaire en le fermant sur un appareil d'utilisation, parce qu'alors l'énergie transmise au champ, au lieu de ne pouvoir réapparaître que dans le circuit primaire, sera récoltée par le secondaire et transmise au dehors en proportion d'autant plus grande que la résistance du circuit sur lequel il débitera sera moindre.

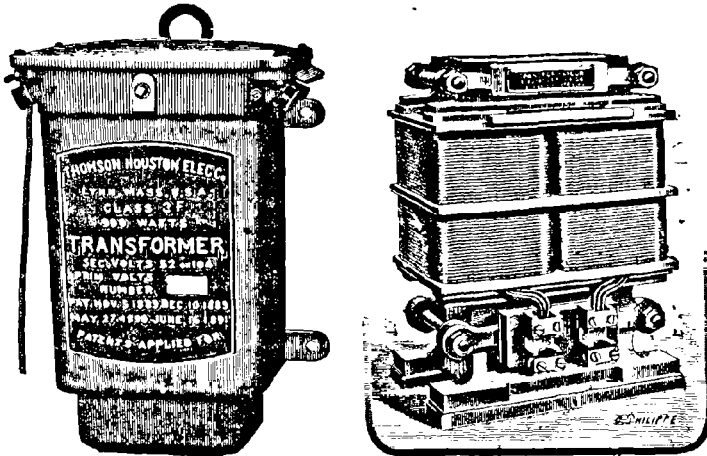


Fig. 175 et 176. — Transformateurs Thomson et Labour.

D'où, à la fermeture du secondaire d'un transformateur sur un circuit extérieur :

1° Diminution rapide du décalage du courant sur la diff. de pot., le décalage d'un quart de période ne pouvant subsister qu'autant que les restitutions d'énergie au primaire sont égales aux absorptions, c'est-à-dire que la puissance moyenne est nulle.

2° Augmentation du débit primaire jusqu'à la valeur nécessaire pour que puisse se faire la transmission au secondaire d'une puissance proportionnée à la résistance de ce secondaire.

Ce dernier fait est en pratique le plus important, de sorte que l'intensité primaire, très faible à circuit secondaire ouvert, augmente rapidement à mesure que le secondaire travaille sur une résistance moindre.

Les transformateurs industriels ne ressemblent pas beaucoup en

général à la bobine de Ruhmkorff, mais les principes qu'ils mettent en jeu sont exactement les mêmes. La principale différence est qu'on y emploie généralement un circuit magnétique *fermé*. Dans ces conditions, la self-induction est plus grande, de sorte qu'un des mérites de ces transformateurs est d'exiger une intensité *à vide* moins grande que ceux à circuit magnétique *ouvert* (1), ce qui est intéressant, car la forte intensité *à vide* des transformateurs à circuit magnétique ouvert, quoique *dévoattée* — le mot dit bien ce qu'il veut dire — n'est pas sans présenter certains inconvénients.

Sans que j'aie besoin d'insister et en vous reportant simplement à ce qui a été dit à propos de l'induction mutuelle, vous comprendrez que le *coefficient de transformation* de tous ces appareils est donné par le rapport du nombre de spires secondaires au nombre de spires primaires: si celles-ci sont moins nombreuses que celles-là, on a un transformateur *élèveur* de tension; on a un transformateur *réducteur* dans le cas contraire.

Rien de plus facile donc, à leur aide, que de résoudre toutes les difficultés résultant des transformations de tension exigées par le transport et la distribution de l'énergie à grande distance.

COURANTS POLYPHASÉS

ET CHAMPS TOURNANTS

Les courants alternatifs que nous avons étudiés jusqu'ici ne sont pas toujours susceptibles d'une utilisation fort aisée.

Comme le courant continu, ils sont, nous l'avons dit, capables d'alimenter des lampes à arc ou à incandescence, mais c'est là pour ainsi dire la seule application à laquelle ils se prêtent commodément: l'électrolyse réclamant évidemment une action toujours de même sens, l'accès de la cuve électrochimique leur est interdit; quant à l'alimentation des moteurs à courant alternatif simple, moteurs *synchrones* ou *asynchrones*, dont nous avons dû passer sous silence la théorie trop complexe, elle rencontre en pratique des difficultés d'application assez considérables.

Cette dernière lacune est particulièrement regrettable.

Si l'on capte à grands frais l'énergie de chutes puissantes pour l'envoyer au loin à l'aide du courant alternatif, ce ne peut être, la

(1) Mais par suite des pertes par hystérésis et par courants de Foucault, la faible intensité *à vide* des transformateurs à circuit magnétique fermé est presque *en phase* avec la f. é. m., et met en jeu, par suite, une certaine puissance *réelle* qui correspond à ces pertes.

plupart du temps, en vue de cette seule application de l'éclairage, nécessairement restreinte; l'utilisation sous forme *mécanique* de l'énergie transmise répond à des besoins autrement étendus : que ce mode d'utilisation fasse défaut, qu'il soit seulement d'une réalisation malaisée, et l'utilité du transport à distance s'en trouverait singulièrement atténuée.

C'est pour combler cette lacune, tout en conservant le bénéfice de la merveilleuse faculté de transformation des courants alternatifs, que courants *polyphasés* et champs *tournants* ont fait leur apparition. Nous ne pouvons nous dispenser d'en dire quelques mots.

Qu'est-ce qu'un champ tournant? Le nom le dit assez.

Considérons une bobine de fil traversée par un courant continu : nous savons qu'elle donne naissance à un champ magnétique dont les lignes de force sont dirigées suivant son axe. Que la bobine soit immobile, le champ produit est lui-même *fixe* dans l'espace. Qu'au

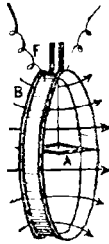


Fig. 177. — Production d'un champ tournant à l'aide d'un circuit mobile.

contraire, la bobine, solidaire d'un axe vertical (fig. 177), prend un mouvement de rotation commandé par cet axe, le champ l'accompagne nécessairement dans son mouvement : Il est devenu un *champ tournant*!

Inutile de vous dire que nous allons apprendre à produire un champ semblable par des moyens plus élégants et plus pratiques; mais, si rudimentaire soit-il, le mode de réalisation que nous venons d'imaginer a l'avantage de nous donner de la chose une idée fort nette.

Plaçons dans ce champ tournant un barreau aimanté, équilibré sur un pivot vertical ou suspendu à un fil : sollicité à chaque instant par les lignes de force du champ à se maintenir dans la direction de l'axe de la bobine, le barreau, quoique indépendant de celle-ci, *participe à son mouvement*.

Nous verrons tout à l'heure que notre champ tournant pourrait tout aussi bien déterminer l'entraînement d'une masse, d'un *induit* susceptible d'effectuer du travail extérieur.

Mais nous allons sans plus tarder voir à reproduire notre rotation d'aiguille aimantée, qui constitue maintenant pour nous le critérium d'un champ tournant, par des procédés purement électriques. Ces procédés reposent précisément sur l'emploi des courants alternatifs *polyphasés*.

On appelle ainsi plusieurs courants alternatifs de même fréquence en tout identiques chacun à ceux que nous avons étudiés, mais qui, se produisant dans des circuits différents, ne passent pas au même instant par les différentes *phases* de leurs variations respectives, l'un par exemple atteignant son maximum quand l'autre s'annule, etc.

S'il y a seulement deux courants, ils sont dits *biphasés*, *triphases* si l'on en considère trois, etc.

Il est facile de concevoir comment on peut obtenir de tels courants : pour produire des courants biphasés, il suffira de disposer sur l'induit de l'alternateur Siemens, par exemple, *deux fois autant* de bobines que de paires de pôles et de faire des bobines paires un circuit, des bobines impaires un autre circuit. La série des

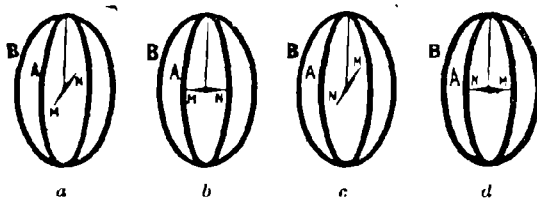


Fig. 178. — Production d'un champ tournant à l'aide de 2 circuits fixes.

bobines paires étant à un moment donné en regard d'une paire de pôles, position de f. é. m. nulle, la série des impaires sera au contraire dans le champ nul, position de f. é. m. maxima (voir page 173), etc. Il y aura donc, entre les deux courants, un décalage d'un quart de période.

Imaginons maintenant deux circuits, A et B, placés à angle droit et traversés par les deux courants diphasés que nous venons d'obtenir. A l'intérieur de ces deux circuits, replaçons notre aiguille aimantée MN.

A un moment donné, le courant dans A est nul, celui dans B étant maximum; MN est donc dirigée suivant l'axe de B puisque B seul agit (fig. 178, *a*). Un instant plus tard, au contraire, c'est B qui s'annule alors que A est maximum; par suite (fig. 178, *b*), MN est amenée suivant l'axe de A. Elle a d'ailleurs été poussée *progressivement* à cette position, car, dans l'intervalle, B a décroît peu à peu, tandis que A augmentait progressivement. Un peu plus tard encore

(fig. 178,c) B est redevenu maximum, mais *en sens inverse*, tandis que A s'est de nouveau annulé. MN devra donc se trouver de nouveau comme en figure *a*, mais en sens inverse, puisque B a changé de sens : elle aura donc accompli à ce moment une rotation de un demi-tour.

Un instant plus tard, B s'annule, A est maximum en sens contraire du cas de la figure *b*, MN vient donc dans la position de la figure *a* ; puis, A s'annulant, B redevenant maximum dans le sens primitif, MN reprend la position de la figure *a*, de sorte que les choses se trouvent rétablies dans l'état initial pour une rotation suivante.

En somme, la tige MN prend un mouvement de rotation continue, comme lorsque tout à l'heure nous faisons tourner notre champ : ainsi, en combinant convenablement les effets de deux circuits FIXES, produisant chacun un champ variable mais de direction constante, nous avons obtenu comme résultante de ces deux actions un *champ tournant* et, ce qu'il y a de mieux, sensiblement *constant*. Notons, toutefois, que ce champ serait plus constant encore s'il était produit au moyen de trois bobines convenablement placées, traversées par trois courants *triphases*. D'après ce qui précède, la *vitesse* de rotation du champ est égale à la vitesse de variation des courants générateurs.

Nous voici donc en état de produire aisément un champ tournant : il s'agit de lui trouver une distraction plus intelligente que de faire tourner une aiguille aimantée.

Or, rien de si facile.

Plaçons dans ce champ tournant un *induit* constitué par de simples spires individuelles fermées sur elles-mêmes et disposées angulairement. Si ces circuits restaient immobiles, chacun serait soumis évidemment aux mêmes variations de flux que si, le champ étant fixe, le circuit considéré y tournait avec une vitesse égale et de sens contraire : ils sont donc siège de f. é. m. alternatives.

Mais puisque ces circuits sont fermés sur eux-mêmes, ces f. é. m. provoquent des courants intenses qui exercent sur le champ inducteur une réaction violente, à la façon des courants qui parcourent l'induit des moteurs à courant continu.

On démontre que la résultante de toutes ces actions partielles tend très énergiquement à faire tourner l'induit *à la poursuite* du champ inducteur.

Comme résultat de cette poursuite, la *vitesse relative* du champ par rapport à l'induit diminue : il en est donc de même de l'intensité des courants induits et de l'effort mis en jeu.

Si l'induit n'a presque pas de travail extérieur à effectuer, il prendra une vitesse sensiblement égale à celle du champ, le *glissement* de celui-ci par rapport à celui-là sera assez lent, les courants induits peu intenses, ainsi, par conséquent, que la puissance absorbée; plus au contraire l'effort sera grand, plus aussi le glissement sera rapide et les courants induits considérables, de sorte qu'on voit qu'ici encore la puissance dépensée se proportionnera d'elle-même à l'effort requis.

De ce sommaire exposé, il résulte donc que les moteurs à champ tournant présentent au démarrage un couple très énergique, comparable à celui qui rend si précieux les moteurs à courant continu en série, parce qu'à ce moment la vitesse du champ par rapport à l'induit est très grande et que les courants induits sont énormes. Mais ils ne sont pas comme ces moteurs-série susceptibles d'emballements dangereux, car il est bien évident que leur vitesse ne saurait spontanément dépasser celle du champ qui les entraîne : ils rappellent donc à cet égard la régularité d'allures qui est le trait le plus intéressant des moteurs en dérivation.

C'est ainsi que parfois en électricité les chercheurs rencontrent d'agréables surprises : en s'ingéniant à adapter le courant alternatif, qui y était rebelle, à la production de la force motrice, on l'a si bien mâté qu'on est arrivé à un type d'appareils présentant une véritable supériorité sur ces outils déjà si remarquables que constituent les moteurs à courant continu !

Sans compter que nous n'avons pas encore insisté sur ce qui constitue peut-être la principale caractéristique du moteur à courants polyphasés : sa merveilleuse simplicité.

Nous avons déjà vu tout à l'heure qu'avec lui, collecteur et bagues deviennent superflus puisque les courants qui entraînent l'induit *yprennent naissance*; ajoutons encore que les spires isolées qui constituent son enroulement peuvent être elles-mêmes supprimées : on a construit des moteurs à champ tournant dans lesquels l'induit se réduit, en tout et pour tout, à *un bloc de fer massif* porté par un axe non isolé : ce sont les courants de Foucault, dont nous avons appris à nous défier jusqu'ici, qui font toute la besogne dans ce moteur paradoxal !

CONCLUSION

Nous arrêterons ici notre promenade à travers l'électricité.

Nous espérons que, si rapide qu'elle ait été, nos lecteurs auront pu *comprendre* ; qu'ils auront appris à aimer notre science, à en apprécier en connaissance de cause les innombrables ressources.

C'a été là notre seul souci.

Le mode de raisonnement que nous avons adopté, on l'a remarqué, ne nous a guère permis de nous rendre compte que des grandes lignes, du sens général des phénomènes : il a été généralement impuissant à nous en faire prévoir la grandeur. Ceci aurait exigé des considérations mathématiques dans lesquelles nous ne pouvions entrer sans dévier complètement de notre programme : nous ne pouvons que renvoyer à des traités plus complets ceux de nos lecteurs qui désireront approfondir une science à laquelle le présent ouvrage ne peut avoir la prétention, c'est bien entendu, que de servir de modeste introduction.

On pourra nous reprocher, on nous reprochera certainement d'avoir présenté les différentes applications dans un enchevêtrement qui fera horreur aux méthodistes :

Avouons humblement que l'ordre officiel a été, en effet, notre moindre préoccupation.

Nous nous sommes efforcé avant tout d'enchaîner le plus possible les faits, de les présenter dans la succession qui, à notre avis, paraissait le plus susceptible de faciliter la compréhension des lecteurs non initiés, ne leur soumettant jamais que ce que les considérations précédentes les avaient mis en état de comprendre.

On nous reprochera sans doute aussi de n'avoir pas accordé aux chapitres pratiques tout le développement qu'il eût été facile de leur faire acquérir — à la condition de multiplier par 4 ou 5 le volume de l'ouvrage — de n'avoir pas donné la

description d'un grand nombre d'appareils très importants et très répandus. Notre réponse sera la même, à savoir : que cet ouvrage n'est pas le moins du monde un formulaire ou un traité pratique à l'usage des ingénieurs.

Mais, dira-t-on aussi, pourquoi cette insistance sur les applications domestiques, sur les piles, les sonneries, dans un ouvrage destiné à l'étude des principes de l'électricité ? Là encore, nous répondons que notre insistance a été voulue ; nous avons pensé que c'est par ces applications domestiques que le débutant apprend à aimer l'électricité, et nous avons voulu lui donner les renseignements nécessaires pour exercer son ingéniosité.

Peut-être, sur ces différents points, nous sommes-nous trompé. Nous avons, en tout cas, fait tous nos efforts pour qu'il n'en soit pas ainsi.

Dans le chemin que nous avons parcouru ensemble, nous avons pu nous rendre compte que l'électricité, en somme, n'est généralement qu'un intermédiaire, intermédiaire entre la source à laquelle nous empruntons l'énergie, charbon, chute d'eau, affinité chimique, — et l'appareil où nous consommons cette énergie sous la forme désirée : énergie calorifique dans la lampe électrique, énergie chimique dans la cuve électrolytique, énergie mécanique dans le moteur électrique, dans le télégraphe, dans le téléphone. Ce n'est pas l'électricité que nous utilisons directement, ce sont les effets qu'elle produit.

Mais quel intermédiaire merveilleux et commode, et combien nous serions embarrassés s'il nous fallait aujourd'hui en être privés !

Quelle abondante moisson, en ces soixante dernières années, et comme ce début donne une haute idée de ce que l'homme, un jour, saura tirer de l'électricité !

Résumons-nous.

Le dix-neuvième siècle a pu, avec raison, s'appeler le siècle de la vapeur.

Si le vingtième siècle, dont nous venons de franchir le seuil, n'est pas LE SIÈCLE DE L'ÉLECTRICITÉ, c'est qu'il tient en réserve de singulières surprises !

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
Notre but.....	5
Courant continu.	
<i>Chapitre premier</i> : Premières constatations.....	7
Piles électriques, différence de potentiel.....	7
Courant électrique.....	12
Sens du courant électrique.....	17
<i>Chapitre deuxième</i> : La mesure dans les phénomènes électriques....	21
<i>Chapitre troisième</i> : Considérations sur les piles usuelles.....	30
Dépolarisation.....	30
Piles à deux liquides.....	32
Influence de la nature des électrodes.....	33
Amalgamation des zincs.....	34
Piles pratiques : Daniell, Bunsen, Radiguet, Leclanché.....	36
<i>Chapitre quatrième</i> : Notion de résistance.....	40
Loi de Ohm.....	44
Multiples et sous-multiples, système C. G. S.....	48
<i>Chapitre cinquième</i> : Puissance.....	52
Circuit électrique.....	58
Résistance intérieure.....	61
Puissance utile, puissance perdue.....	65
Rendement d'une source d'électricité.....	69
<i>Chapitre sixième</i> : La lutte contre la résistance intérieure.....	72
Suppression du vase poreux, pile Méritens.....	72
Piles à écoulement : Mauduit, Fiorina, Devaux.....	75
<i>Chapitre septième</i> : Couplage des piles et des résistances.....	84
Choix du couplage.....	89
Influence de la tension sur les propriétés de l'énergie électrique....	95
Couplage des résistances.....	97
<i>Chapitre huitième</i> : Principe des instruments de mesure.....	101
Ampèremètres et voltmètres. Bonhomme d'Ampère.....	101
<i>Chapitre neuvième</i> : Calcul d'une installation d'éclairage par piles....	109
Lampes à incandescence, lampe Nernst.....	109
Combinaisons diverses d'éclairage domestique.....	113
<i>Chapitre dixième</i> : Electrochimie.....	116
Condition pour que l'électrolyse se produise.....	118
Lois de l'électrolyse.....	120
Electrolyse à anode soluble.....	123
<i>Chapitre onzième</i> : Applications de l'électrochimie.....	126
Les accumulateurs électriques.....	126
Principe des accumulateurs.....	128
Accumulateurs Planté, Faure, etc.....	129

	Pages
Emplois, inconvénients des accumulateurs.....	132
Galvanoplastie : dépôts électrochimiques.....	135
Dorure, argenture, nickelage.....	138
Raffinage électrique des métaux.....	140
Préparation électrolytique des produits chimiques.....	140
Electro-magnétisme	142
<i>Chapitre douzième</i> : L'induction magnétique.....	143
Courants induits par les aimants ; champ magnétique.....	144
Fantômes magnétiques.....	147
<i>Chapitre treizième</i> : Applications des électro-aimants.....	155
Sonneries électriques à signaux variés.....	155
Règle du tire bouchon de Maxwell.....	156
Principe du télégraphe.....	160
Principe du téléphone.....	162
Le télégraphone.....	164
Les lampes à arc.....	166
Régulateurs en série et en dérivation ; lampes Cance, Brienne.....	168
<i>Chapitre quatorzième</i> : principe des machines à courant continu.....	172
Courants de Foucault.....	178
Hystérésis.....	181
Collection du courant.....	183
Production du champ inducteur.....	185
Modes d'excitation des dynamos. Excitation en série, en shunt et compound.....	187
<i>Chapitre quinzième</i> : Examen de quelques types de machines à courant continu.....	192
Utilisation de l'énergie humaine.....	192
Machines multipolaires.....	195
Induits en tambour.....	197
<i>Chapitre seizième</i> : Moteurs à courant continu.....	201
Moteurs en série.....	207
Moteurs en dérivation.....	210
<i>Chapitre dix-septième</i> : Applications des moteurs.....	212
Transmission d'énergie dans les usines.....	212
Utilisation mécanique de l'énergie des réseaux d'éclairage.....	214
Traction électrique.....	215
Transmission de l'énergie à distance.....	218
Labourage électrique.....	220
Compteurs électriques : O' Keenan, Thomson, etc.....	222
Un conseil en passant.....	225
Courants variables	228
<i>Chapitre dix-huitième</i> : Self-induction.....	228
<i>Chapitre dix-neuvième</i> : Applications de la self-induction.....	233
Rôle protecteur de la self dans les machines ; disjoncteurs.....	238
Allumoirs, parafoudres.....	238
<i>Chapitre vingtième</i> : Induction mutuelle.....	242
Transformateurs.....	248
<i>Chapitre vingt et unième</i> : Bobine de Ruhmkorff.....	250
Phénomène de Lagrange et Hoho ; interrupteur Wehnelt.....	254
Tubes de Geissler.....	257
Rayons cathodiques, rayons de Röntgen, radiographie.....	259

	Pages
<i>Chapitre vingt-deuxième</i> : La capacité	262
Représentation hydraulique de la capacité, véritable rôle des isolants.	266
Oscillations électriques.....	271
<i>Chapitre vingt-troisième</i> : Haute fréquence.....	277
Production de la haute fréquence, dispositifs Tesla, d'Arsonval.....	277
Effets de la haute fréquence.....	279
Télégraphie sans fils.....	284
Expériences de Hertz.....	284
Tubes de Branly	286
Courants alternatifs	288
<i>Chapitre vingt-quatrième</i> : Courants alternatifs simples; représentation hydraulique.....	288
F. é. m. alternative sur résistance sans self.....	291
Mesure des courants alternatifs.....	293
Diff. de pot. et courants efficaces.....	294
F. é. m. alternative sur self-induction.....	295
Puissance apparente et puissance réelle.....	299
F. é. m. alternative sur capacité.....	303
F. é. m. alternative sur self-induction et capacité en série.....	308
F. é. m. alternative sur self-induction et capacité en dérivation.....	312
<i>Chapitre vingt-cinquième</i> : Alternateurs et transformateurs	315
Courants polyphasés et champs tournants.....	323
<i>Conclusion</i>	329


~~~~~  
PARIS. — IMPRIMERIE ALCAN-LÉVY, 24, RUE CHAUCHAT  
~~~~~