

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

1- Le Conservatoire numérique communément appelé le Cnum constitue une base de données, produite par le Conservatoire national des arts et métiers et protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle. La conception graphique du présent site a été réalisée par Eclydre (www.eclydre.fr).

2- Les contenus accessibles sur le site du Cnum sont majoritairement des reproductions numériques d'œuvres tombées dans le domaine public, provenant des collections patrimoniales imprimées du Cnam.

Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n° 78-753 du 17 juillet 1978 :

- la réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur ; la mention de source doit être maintenue ([Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers - http://cnum.cnam.fr](http://cnum.cnam.fr))
- la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

3- Certains documents sont soumis à un régime de réutilisation particulier :

- les reproductions de documents protégés par le droit d'auteur, uniquement consultables dans l'enceinte de la bibliothèque centrale du Cnam. Ces reproductions ne peuvent être réutilisées, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.

4- Pour obtenir la reproduction numérique d'un document du Cnum en haute définition, contacter [cnum\(at\)cnam.fr](mailto:cnum(at)cnam.fr)

5- L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment possible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

6- Les présentes conditions d'utilisation des contenus du Cnum sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

Auteur(s)	[s.n.]
Titre	Enseignement télégraphique : résumé des cours faits à l'administration des lignes télégraphiques - 1858-1859 : cours pratique ; [suivi de] cours théorique
Adresse	Paris : imprimerie et librairie centrales des chemins de fer de Napoléon Chaix et Cie, [1860]
Collation	1 vol. (220-182 p.) : ill. ; 18 cm
Nombre d'images	408
Cote	CNAM-BIB 12 Sar 148
Sujet(s)	France : Ministère de l'intérieur : Direction générale des lignes télégraphiques (1858-1879) Télégraphe -- 19e siècle -- Manuels d'enseignement
Thématique(s)	Technologies de l'information et de la communication
Typologie	Ouvrage
Note	Annexe au "Moniteur télégraphique".
Langue	Français
Date de mise en ligne	21/01/2021
Date de génération du PDF	20/01/2021
Permalien	http://cnum.cnam.fr/redir?12SAR148

ENSEIGNEMENT TÉLÉGRAPHIQUE.

COURS PRATIQUE.

Sav. 148

ENSEIGNEMENT TÉLÉGRAPHIQUE

RÉSUMÉ DES COURS

FAITS

A L'ADMINISTRATION DES LIGNES TÉLÉGRAPHIQUES

1858-1859

COURS PRATIQUE



PARIS

IMPRIMERIE ET LIBRAIRIE CENTRALES DES CHEMINS DE FER
DE NAPOLEON CHAIX ET C°

Rue Bergère, 20, près du boulevard Montmartre.

RÉSUMÉ DES COURS
DE
TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE
FAITS AU MINISTÈRE DE L'INTÉRIEUR
POUR L'INSTRUCTION DES AGENTS DE L'ADMINISTRATION
DES LIGNES TÉLÉGRAPHIQUES

(Annexe au *Moniteur Télégraphique*.)

INTRODUCTION.

Les cours institués cette année à l'Administration télégraphique se sont tout naturellement divisés en deux parties.

1° *Le Cours théorique d'électricité*; 2° *le Cours d'application de l'électricité à la télégraphie*. C'est ce dernier que nous donnons ici sous le titre de *Cours de télégraphie électrique*.

Il y a déjà longtemps qu'a été émise l'idée de faire de la télégraphie au moyen de l'électricité, c'est-à-dire de transmettre au moyen de l'électricité des signes représentant la parole ; mais les progrès accomplis en ces dernières années dans les appareils générateurs de l'électricité, et ceux encore plus considérables qui ont été acquis dans la connaissance des lois que suit la marche de l'électricité, ont seuls pu permettre de rendre pratique ce qui jusqu'alors était resté confiné dans le domaine de la spéculation théorique.

Ce qui avait surtout séduit dans la télégraphie électrique, c'est la rapidité extrême avec laquelle cet agent se transmet dans des fils conducteurs. Aussi voyons-nous de 1787 à 1813, un grand nombre de projets de télégraphie fondés sur la transmission de l'étincelle électrique; mais la complication des appareils et surtout la difficulté de produire l'électricité d'une manière pratique et constante au moyen de la machine électrique, rendirent toutes les tentatives infructueuses.

Au commencement de ce siècle, Volta inventa une source d'électricité beaucoup plus maniable que la machine électrique : c'est la pile qui porte son nom. Toutefois, l'électricité ainsi produite ne donne pas d'étincelles; aussi fallut-il attendre la découverte faite par Nicholson et Carlisle de la décomposition de l'eau, au moyen du courant de la pile, pour voir éclore, en 1811, un premier projet de télégraphie électrique dans lequel on employait le courant voltaïque. C'est Sœmmering qui est

l'auteur de ce projet. Il proposait de placer, entre les deux points à réunir télégraphiquement, autant de conducteurs que de signaux à transmettre; ces conducteurs étaient composés de deux fils, un d'aller et l'autre de retour. La décomposition de l'eau par les courants produits dans l'un ou l'autre de ces conducteurs, indiquait le signal transmis.

Je n'ai pas besoin de dire que le nombre des conducteurs, la lenteur de la transmission pour que les effets fussent appréciables, rendaient ce système inapplicable.

En 1820, après la découverte de l'action du courant sur l'aiguille aimantée, faite par le savant danois Oersted, Ampère proposa de recevoir la transmission du courant dans les vingt-quatre conducteurs, au moyen de l'aiguille aimantée. On voit immédiatement les inconvénients de ce système.

1° Il fallait un courant énergique, un seul fil agissant sur l'aiguille aimantée;

2° On employait un grand nombre de conducteurs comme le télégraphe de Sœmmering. Fechner, savant allemand, leva la première difficulté en proposant l'emploi du galvanomètre multiplicateur. MM. Ritchie et Alexander d'Edimbourg, construisirent, en 1837, un télégraphe d'après les idées d'Ampère, en diminuant toutefois le nombre des fils, ou se servant d'un fil commun pour les vingt-quatre conducteurs, ce qui réduisit le nombre des fils à vingt-cinq.

Mais c'est à Schelling, qui essaya son système en Russie en présence des empereurs Alexandre et Nicolas, que l'on doit l'idée de la combinaison des signaux successifs. Il amortissait les ébranlements de l'aiguille en faisant plonger dans le mercure un petit appendice fixé aux aiguilles. Toutefois il ne réussit pas, par défaut de détail de construction sans doute, car, en définitive, c'est le télégraphe Wheatstone à deux aiguilles.

Gauss et Weber, en 1833, établirent à Goettingue, entre l'observatoire et le cabinet de physique, le premier télégraphe qui ait donné quelques résultats. Ils employèrent le système de Schelling et se servirent de cinq déviations de l'aiguille, ce qui donnait soixante-deux signaux. La production du courant avait lieu au moyen d'une bobine d'induction; un étouffeur en cuivre rouge amortissait les oscillations de l'aiguille.

Steinehl à Munich, en 1837, sur l'invitation du roi de Bavière, perfectionna le télégraphe précédent. Il employa une machine de Clarke pour produire les courants et se servit de deux aiguilles, ce qui diminua le nombre des mouvements à faire.

Chaque aiguille portait, soit un petit encrier d'encre d'imprimerie terminé par une pointe capillaire qui marquait des points sur une bande de papier, soit sur un petit marteau qui frappait sur des timbres différents.

Gauss avait proposé de se servir de rails comme conducteurs; Steinehl fit quelques expériences pour

essayer ce système sur le chemin de fer de Nuremberg à Furth. Il ne réussit pas, mais découvrit la propriété conductrice de la terre et diminua ainsi heureusement le nombre des fils conducteurs, ce qui, au point de vue de l'économie et de l'intensité du courant, est un grand avantage. Cette conductibilité de la terre était connue pour l'électricité statique et non pour l'électricité voltaïque.

C'est vers cette époque, 1837, que Wheatstone inventa sa sonnerie, qui lui a donné l'idée de son télégraphe à cadran. Dès 1832, Morse eut l'idée de son télégraphe pour lequel il prit un brevet en 1837, et vers la même époque, Bain inventa son télégraphe électro-chimique. Nous n'en donnerons pas ici la description, ces télégraphes étant en usage en divers pays ; nous en donnerons plus tard une description détaillée.

Un télégraphe électrique se compose essentiellement :

- 1° D'un générateur de l'électricité ;
- 2° Des appareils qui servent, soit à mettre le générateur à même de fonctionner, soit à percevoir le courant ;
- 3° Des appareils accessoires, tels que sonnerie, paratonnerres, etc. ;
- 4° Du conducteur ou ligne électrique.

C'est dans cet ordre que nous étudierons les diverses parties du télégraphe.

Toutefois, nous ne parlerons qu'accessoirement du conducteur ou ligne télégraphique, cette partie n'étant pas utile aux employés auxquels ce cours est destiné.

APPLICATION DE L'ÉLECTRICITÉ A LA TÉLÉGRAPHIE.

CHAPITRE PREMIER.

DES GÉNÉRATEURS DE L'ÉLECTRICITÉ.

Les seuls générateurs de l'électricité employés jusqu'ici en télégraphie, sont les piles et les appareils d'induction, c'est-à-dire ceux dans lesquels l'électricité est produite par l'action chimique ou par l'induction. Cette induction d'un courant dans un fil a lieu soit au moyen de la désaimantation ou de l'aimantation du fer d'un électro-aimant, soit au moyen de l'établissement et de l'interruption d'un courant dit primaire ou inducteur.

Toutefois, avant de parler des piles, quelques notions chimiques sont indispensables.

3^e [tr.]

NOTIONS ÉLÉMENTAIRES DE CHIMIE.

On appelle en chimie corps simples, ceux qu'on n'est pas encore parvenu à décomposer. Les corps simples se combinent entre eux, soit deux à deux, soit en plus grand nombre pour former les corps composés.

L'eau est un corps composé qu'un courant électrique qui le traversera sépare en ses deux éléments, qui sont deux corps simples, l'oxygène et l'hydrogène.

L'oxygène est un gaz, c'est-à-dire un fluide léger, élastique; il est incolore et jouit de propriétés chimiques très-remarquables. Il s'unit avec presque tous les corps, souvent avec combustion vive, c'est-à-dire avec développement de chaleur et de lumière; c'est donc un comburant énergique; ses combinaisons avec les corps portent le nom d'oxydes ou d'acides, selon leurs propriétés chimiques.

L'hydrogène est un corps gazeux comme l'oxygène, mais il jouit de propriétés chimiques complètement opposées. L'oxygène est un comburant énergique, c'est-à-dire qui brûle presque tous les corps; l'hydrogène est un combustible énergique, c'est-à-dire se combine avec énergie aux corps comburants, et même réduit beaucoup de composés de l'hydrogène, en se combinant avec l'oxygène et mettant en liberté le corps oxydé.

Parmi les corps simples, les uns se comportent comme l'hydrogène, ce sont les corps combustibles; et les autres comme l'oxygène, ce sont les corps comburants. Enfin, il existe une troisième classe de corps, dits neutres ou indifférents, qui agis-

sent d'une manière faible, tantôt comme comburants, tantôt comme combustibles.

Entre les corps comburants, nous citerons : l'oxygène, le soufre, le fluor, le chlore, le brôme, l'iode, etc....

Parmi les corps combustibles : l'hydrogène, le potassium, le sodium, le barium, le calcium, le magnésium, le zinc, le cadmium, l'aluminium, le fer, le cuivre, le mercure, l'argent, l'or, le platine.

Parmi les corps neutres : l'azote, le phosphore, l'arsenic, le carbone, le silicium, etc....

Il est clair que ces divisions ne sont pas parfaitement tranchées, et que l'on passe d'une manière pour ainsi dire insensible d'une division à l'autre.

Les seules combinaisons de ces corps simples qui aient quelque intérêt pour ce cours, sont celles sur lesquelles le courant électrique a une action de décomposition. Quand un corps composé est traversé par un courant électrique, il se décompose : une partie se rend au pôle positif de la pile, et l'autre au pôle négatif; c'est le corps comburant qui se rend à l'électrode positif, et le corps combustible qui se rend à l'électrode négatif. Si le corps décomposé est composé de plus de deux corps simples, alors un corps composé, ou un mélange de plusieurs corps simples, peut se rendre aux électrodes. Nous considérerons ce mélange comme les éléments d'un corps composé détruit par des causes étrangères au courant, et nous dirons que le courant qui traverse un corps composé le sépare en deux composants simples, ou composés dont l'un comburant se rend à l'électrode positif et l'autre combustible à l'électrode négatif.

Les corps simples ont des noms arbitraires; quant aux corps composés, on les désigne par des noms dérivés de ceux de leurs composants, et nous venons de voir que les seuls que nous con-

sidérions peuvent être considérés comme composés de deux éléments simples ou composés. On peut commencer par le comburant que l'on termine en *ide* et que l'on joint au corps combustible par la particule *de*. Ainsi, on dira *oxide de fer*, *oxide de zinc*, *oxide de potassium*, pour un composé d'oxygène et de fer, ou de zinc, ou de potassium. On dira également *sulfide*, *chloride*, etc..., d'un corps quelconque, pour la combinaison du soufre, du chlore avec ce corps. Au lieu de commencer par le corps comburant, on peut commencer par le corps combustible, et du nom du comburant on forme un adjectif terminé en *idé*; ainsi on dira *fer*, *cuivre*, *zinc*, etc., *oxidé*, *sulfidé*, *chloridé*, etc.

Les corps analogues peuvent se substituer les uns aux autres; ainsi, nous avons vu que l'hydrogène réduit un certain nombre d'oxides en se substituant au métal pour former de l'eau. Cette propriété a lieu pour tous les corps analogues; le zinc, le fer se substituent au cuivre, à l'argent, etc. Quand un corps se substitue à un autre, c'est toujours en proportion constante; ainsi, l'oxygène remplace toujours un poids de soufre deux fois plus considérable que le sien. Ces rapports constants sont les équivalents des corps; deux de soufre équivalent à un d'oxygène. Pour plus de simplicité, on prend pour unité un quelconque de ces corps, ou l'oxygène, ou l'hydrogène, et on rapporte tous les autres à ceux-là. Quand on prend l'oxygène, on fait son équivalent égal à 100, alors le soufre a pour équivalent 200, l'hydrogène 12.50, le carbone 75, etc.

Deux corps peuvent se combiner entre eux en plusieurs proportions, mais c'est toujours un certain nombre d'équivalents de l'un avec un certain nombre d'équivalents de l'autre. Ces nombres d'équivalents sont très-restrints en chimie inorganique, c'est-à-dire chez les corps qui ne sont pas produits directs ou dérivés d'un corps organisé. Ces nombres sont ordinairement: 1 à 1, 2 à 3, 1 à 2, 1 à 3, 1 à 4, 1 à 5, 2 à 5, 2 à 7, 1 à 6; ce sont les seuls qui peuvent nous intéresser. Quand un com-

posé de deux éléments renferme deux équivalents du comburant, on met le mot *bi* devant le nom de ce dernier ; ainsi le bioxyde de manganèse, ou manganèse bioxidé, est un corps qui renferme deux équivalents d'oxygène et un de manganèse. Si le rapport est deux tiers ou un à un et demi, on met le mot *sesqui* ; ainsi, le sesquioxide de manganèse renferme deux équivalents de manganèse et trois d'oxygène. Enfin, s'il y a deux équivalents du combustible pour un du comburant, on termine le nom de ce dernier en *idule* ; ainsi l'oxidule de mercure renferme deux équivalents de mercure et un d'oxygène.

Lorsque le rapport de nombre d'équivalents du comburant à celui du combustible est plus élevé que deux, le corps n'existe le plus souvent pas à l'état isolé, et plusieurs chimistes ne les considèrent pas comme des composés binaires, dans le cas où ils existent en cet état d'isolement. Ils sont ordinairement combinés avec des composés qui renferment le plus souvent les mêmes comburants qu'eux ; on les appelle acides. Ainsi, le composé de un équivalent de soufre et trois d'oxygène, ou acide sulfurique anhydre, est ordinairement mis avec un oxyde : ces oxydes sont alors appelés bases, et leurs combinaisons avec les acides forment ce que l'on appelle des sels. Les acides se désignent en terminant en *eux* ou en *ique*, le nom du combustible : les premiers sont ceux qui contiennent la moindre quantité du corps comburant : ainsi, on dit acide sulfureux, sulfurique. On les fait aussi précéder des mots : *hypo* et *hyper*, selon que l'on veut désigner des acides moins ou plus oxygénés que ceux qui sont terminés en *eux* et en *ique* ; on dit acide hydrochlureux, chloreux, hypochlorique, chlorique, hyperchlorigue, en suivant l'ordre du degré d'oxidation du chlore.

Les sels, c'est-à-dire les combinaisons des acides et des bases se désignent par le nom de l'acide dans lequel on change la terminaison *eux* en *ite*, et la terminaison *ique* en *ate* ; on appelle donc chlorate de potasse, la combinaison de l'acide chlorique et

de la potasse; hypochlorite de potasse, la combinaison de l'acide hypochloreux et de la potasse. Au lieu de sulfate d'oxide de fer, de cuivre, etc., on dit seulement sulfate de fer, de cuivre, on pourrait dire fer, cuivre.... sulfaté....

L'équivalent d'un corps se désigne d'une manière abrégée par les premières lettres de son nom, ainsi :

L'équivalent du potassium ou *kalium*, s'écrit . . . K.

Celui du sodium ou <i>natrum</i>	Na.
— du zinc	Zn.
— du cuivre	Cu.
— du fer.	Fe.
— du mercure ou <i>hydrargyrum</i> . . .	Hg.
— du platine	Pt.
— de l'or ou <i>aurum</i>	Au.
— de l'hydrogène	H.
— de l'oxygène	O.
— du soufre	S.
— du chlore	Cl.
— du carbone.	C.
— de l'azote	Az.

Les composés s'écrivent d'une manière abrégée, en indiquant le signe représentatif des composants, mais en notant par un chiffre placé en haut, et à droite du signe, le nombre d'équivalents du corps désigné que renferme le composé.

Ainsi le protoxide de potassium, s'écrit	Ko.
— — de sodium , —	Nu O.
— — de cuivre , —	Cu O.
Le sous-oxide de cuivre ,	Cu ² O.
Le sesqui-oxide de fer ,	Fe ² O ³ .
L'acide sulfurique anhydre ,	So ³ .
L'acide nitrique anhydre ,	Az O ⁵ .

Les sels considérés comme combinaison d'un acide anhydre et d'une base s'écrivent en réunissant par un point le signe de l'acide et de la base.

Ainsi le sulfate de potasse s'écrit $\text{So}^3 \text{ Ko.}$

Le chlorate de soude, — $\text{Clo}^5 \text{ NaO.}$

Nous avons dit que quand un corps est décomposé par le passage du courant, une partie des éléments se rend à l'électrode positif et l'autre à l'électrode négatif; on peut considérer alors le corps comme composé de deux éléments eux-mêmes composés. On explique cette décomposition des corps par le passage du courant, en admettant que le courant donne aux éléments une polarité, en séparant l'électricité naturelle du corps en électricité positive et négative, dont l'une se porte sur un des éléments, et l'autre sur l'autre élément; le choix en est déterminé par le rapport de nature de ces éléments. On peut faire un tableau des corps tel que chacun d'eux sera électro-positif par rapport à ceux qui précédent, et électro-négatif par rapport à ceux qui suivent. Ainsi le soufre est positif par rapport à l'oxygène, et négatif avec tous les métaux.

Cette hypothèse de la combinaison binaire des corps que décompose le courant, a fait admettre que, lors de la combinaison d'un acide avec une base, l'acide s'emparait de l'élément électro-négatif de la base et se combinait avec lui en formant un nouveau corps qui, à son tour, s'unissait à l'élément positif de cette base. Dans ce cas, si l'acide sulfurique So^3 se combine avec la potasse Ko , il en enlève l'oxygène O de ce dernier corps pour en former un nouveau So^4 auquel les Anglais donnent le nom d'*oxisulfion* et que nous appellerons *sulfatogène*, et ce sulfatogène se combine avec le potassium. Le sel ainsi formé s'écrit alors $\text{So}^4 \cdot \text{K}$, et nous l'appellerons potassium sulfaté ou sulfate de potasse.

Nous désignerons ces corps hypothétiques en terminant en

gène le nom de l'acide modifié pour désigner le sel ; ainsi nous dirons sulfitogène, nitratogène, chloratogène, etc.

Les acides hydratés ne seront pour nous que des sels dont la base est de l'eau, en sorte que nous considérerons l'acide sulfureux mono-hydraté $\text{SO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ comme du sulfate d'eau, ou plutôt de l'hydrogène sulfaté, que nous écrirons $\text{SO}_4 \cdot \text{H}$, de même que l'acide chlorydrique ou hydrogène chlorydé, s'écrira $\text{Cl} \cdot \text{H}$.

Cette manière de considérer les sels aura pour nous l'avantage de simplifier l'explication de la décomposition des corps par l'électricité, et de la production de l'électricité par les actions chimiques, en réunissant, pour ainsi dire, dans une seule classe les oxides, les sulfures, etc., les sels haloïdes et les sels ordinaires, sans toutefois prétendre que cette hypothèse soit la plus conforme à la réalité.

§ II.

THÉORIE DE LA PILE.

Avant de commencer l'exposé succinct de la théorie de la pile, nous allons indiquer quelles sont les principales propriétés du courant électrique qui servent à le mesurer. Ces propriétés sont au nombre de trois, savoir : la décomposition des corps composés que le courant traverse, l'échauffement de ces conducteurs quels qu'ils soient ; enfin, la déviation de l'aiguille aimantée par un courant parallèle à cette aiguille. Nous ne parlerons que de cette dernière.

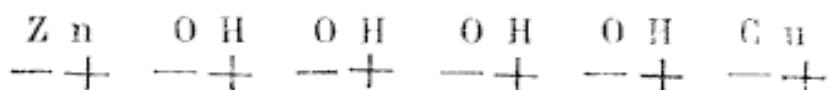
Si l'on place une aiguille aimantée sur un pivot, de façon que, comme dans la boussole ordinaire, elle puisse prendre toutes les orientations possibles ; si l'on place un conducteur parallèlement à cette aiguille et que l'on détruise l'action de la

terre, elle est déviée et de telle façon que, si nous admettons pour cette aiguille un orient et un occident, en lui donnant un nord et un sud déterminés par ses pôles, le courant d'électricité positive ira d'orient en occident, comme le soleil semble tourner par rapport à la terre. Si l'on veut, le pôle nord étant considéré comme la tête et le pôle sud comme les pieds, l'aiguille déviera de manière que le courant d'électricité positive ira de gauche à droite. La terre contre-balance cette action, alors l'aiguille prend une position intermédiaire entre l'action directrice de la terre et l'action directrice du courant, et elle est d'autant plus rapprochée de cette dernière que le courant est plus fort. On peut graduer l'appareil en faisant passer 1, 2, 3, — courants égaux parallèles et de même sens, alors on sait quelle intensité du courant répond à chacune de ces déviations. Nous parlerons plus loin et plus en détail de la mesure des courants; nous avons voulu seulement indiquer un moyen de mesurer les courants avant de passer à la théorie des générateurs de l'électricité.

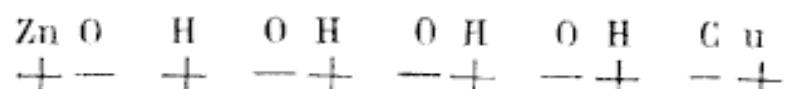
Nous avons vu que Volta avait découvert un nouveau mode de production de l'électricité; nous n'indiquerons pas comment cette idée est née des considérations théoriques qu'il soutenait sur l'origine du phénomène découvert par Galvani, à savoir, l'excitation nerveuse qu'une pince métallique engendre dans l'organisation d'une grenouille fraîchement écorchée et suspendue par cette pince. Volta admettait que deux métaux en contact, le cuivre et le zinc, par exemple, prenaient, l'un par rapport à l'autre, des électricités de noms contraires qui étaient l'origine du courant. Cette théorie, connue sous le nom de théorie du contact, est aujourd'hui généralement abandonnée en France et en Angleterre pour la théorie électro-chimique, qui considère les actions chimiques comme source d'électricité. C'est celle que nous allons exposer brièvement.

Si nous considérons une lame de cuivre et une lame de zinc plongeant toutes les deux dans l'eau, une molécule du zinc attirera la molécule d'oxygène, qui, avec la molécule d'hydro-

gène, composent l'eau voisine H_2O , sans toutefois pouvoir décomposer cette dernière. En vertu de la polarité électrique que nous avons admis comme existant dans les atomes, en même temps que le zinc attire l'oxygène sur lequel se trouve le pôle négatif de l'élément eau, il tourne vers ce pôle son pôle positif, et augmente les deux polarités qui, par suite de leur action réciproque, s'exaltent l'une l'autre. La molécule d'eau ainsi orientée et exaltée dans sa polarité, agit par son hydrogène et son pôle positif sur la deuxième molécule d'eau en l'orientant. Cette seconde molécule agit de même sur la troisième, et ainsi de suite jusqu'à la dernière. Cette dernière est en contact avec le cuivre qui, tendant à agir comme le zinc, devrait produire un effet inverse ; mais comme son action sur l'eau est moins vive que celle du zinc, il ne peut que diminuer l'effet de ce dernier. En admettant donc la rotation chimique et indiquant par les signes $+$ et $-$ les pôles positifs et négatifs des molécules, on aura la disposition suivante :



dans laquelle toutes les molécules oxygénées et les pôles négatifs sont tournés vers le zinc, et les molécules hydrogénées ainsi que les pôles positifs sont tournés vers le cuivre : quant aux molécules extrêmes, celle qui a le plus d'affinité pour l'oxygène, le zinc, a son pôle négatif tourné vers l'eau, et l'autre, au contraire, son pôle positif tourné vers ce liquide. Si l'on venait à enlever à la molécule zinc son électricité négative et à la molécule cuivre son électricité positive, alors l'action de l'électricité positive sur la négative de l'eau n'étant plus diminuée, il y aurait réunion des deux électricités et en même temps des deux molécules qui en sont chargées, c'est-à-dire du zinc et de l'oxygène. Ainsi on aurait :



Mais alors la molécule d'hydrogène de la première molécule d'eau se trouve mise en liberté et chargée d'électricité positive ; elle agit alors comme vient de le faire la molécule du zinc, elle se combine avec la molécule d'oxygène de la molécule d'eau suivante, et met en liberté ses composants d'hydrogène chargés d'électricité positive.

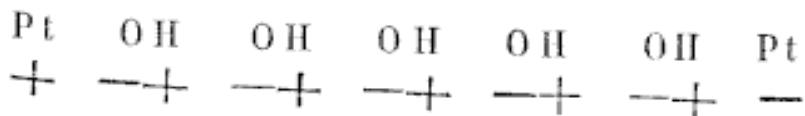
Cette seconde molécule d'hydrogène agit comme la première, et ainsi de suite, jusqu'à la dernière molécule d'eau dont l'hydrogène se dépose sur le cuivre ; elle est chargée d'électricité positive qui se combine avec la négative de ce métal et le rend à l'état naturel. L'espace compris entre le cuivre et le zinc, au lieu d'être rempli par des molécules d'eau seulement, aurait pu être rempli par d'autres molécules, oxyde de zinc ZnO , sulfate d'eau SO^4H , sulfate de zinc SO^4Zn ; le raisonnement eût été le même, l'élément comburant se fût tourné vers le zinc, le combustible vers le cuivre, et quand on aurait enlevé l'électricité négative au zinc et la positive au cuivre, le zinc se serait combiné avec l'élément comburant de la molécule suivante, et l'élément combustible de chacune des molécules intermédiaires se fût combiné avec l'élément comburant de la molécule suivante.

Si derrière la molécule de zinc que nous venons de combiner, il s'en trouve une autre, la même orientation moléculaire que nous avons décrite pour la première molécule de zinc se reproduira, et, si nous lui enlevons son électricité négative et la positive du cuivre, la même combinaison de la molécule de zinc et la même décomposition réciproque des molécules du corps intermédiaire se répéteront également. Ces deux phénomènes d'orientation et de polarisation, de combinaison et de décomposition, se répéteront sans cesse tant qu'il y aura du zinc et tant qu'on enlèvera l'électricité positive de ce corps et la négative du cuivre. Or nous avons un moyen simple d'opérer ce double enlèvement d'électricité aux deux corps cuivre et zinc, c'est de les réunir métalliquement, car alors les deux électricités positive et négative

tive qui tendent à s'échapper de chacun d'eux se combinant par l'intermédiaire du conducteur métallique, s'annulent, et les deux corps, le zinc et le cuivre, reviennent sans cesse à l'état naturel. Si donc on plonge une lame de zinc et une lame de cuivre dans un liquide susceptible d'être décomposé, quand on réunira ces deux lames par un conducteur métallique, il sera traversé sans cesse par un courant électrique produit par la réunion des deux électricités des lames, et en même temps il y aura dissolution du zinc et marche de l'oxygène du cuivre au zinc et de l'hydrogène du zinc au cuivre. Ces deux lames d'où s'échappent les deux électricités sont dites les pôles du générateur de l'électricité; les corps métalliques mis en contact avec chacun d'eux sont appelés électrodes (chemin de l'électricité). Le pôle qui fournit l'électricité positive, c'est-à-dire le pôle cuivre, est dit pôle positif, et son électrode, électrode positif; le pôle zinc est le pôle négatif, et son électrode, l'électrode négatif.

Si, au lieu de plonger dans un liquide deux lames, dont l'une a une action chimique très-forte sur un des éléments du liquide, et dont l'autre en a une très-faible, on y plongeait deux lames ayant des actions chimiques de même force, par exemple, deux lames de cuivre, deux lames de platine, etc., il n'y aurait plus comme tout à l'heure ni orientation avant la jonction des lames par un conducteur métallique, ni courant électrique après cette jonction, car les effets qu'elles produiraient se détruirait reciprocement. Mais si l'on charge l'une d'électricité positive, et l'autre d'électricité négative, alors la lame qui est chargée d'électricité positive agit comme le zinc et se dissout si elle est combustible, et l'autre, au contraire, recueille le combustible du liquide. L'orientation des molécules du liquide n'est plus alors déterminée par l'affinité chimique d'une des lames, mais par son électricité, et comme aucune réaction électrique ne vient arrêter cette action, la décomposition suit immédiatement cette orientation. Le corps ainsi décomposé s'appelle *électrolyte* (décomposé par l'électricité), et l'opération en elle-même s'appelle *électro-*

lyse. Supposons, pour exemple, deux lames ou électrodes de platine plongeant dans l'eau; on aura d'abord l'orientation suivante des molécules de l'électrolyte, en employant la même notation que précédemment.



et immédiatement après, décomposition de l'électrolyte et dépôt de ses deux éléments sur les électrodes :



puis l'orientation recommence ensuite la décomposition, et ainsi de suite.

Des explications précédentes il résulte que lorsqu'on plonge deux plaques de métal dans un liquide, chaque métal tend à se dissoudre en envoyant à l'autre de l'électricité positive et en gardant de l'électricité négative, et que le résultat final est de l'électricité positive sur la lame qui a le moins de tendance à être attaquée et de la négative sur l'autre, ou un courant d'électricité positive allant de la première à la dernière, si les deux lames sont jointes par un corps conducteur de l'électricité. Le résultat en quantité est la différence des effets que tend à produire séparément chaque lame.

On appelle force électro-motrice, la force avec laquelle un métal, se dissolvant dans un liquide, tend à séparer les deux électricités, en envoyant la positive dans le liquide et la négative dans le métal: C'est au point de contact du métal et du liquide que se développe cette force. Il est évident qu'elle est proportionnelle à la tension électrique développée, quand il n'y a pas de courant.

On voit tout d'abord qu'il est impossible de produire un courant avec une seule lame plongeant dans un liquide; il en faut nécessairement deux, et alors la tension électrique sur chaque pôle est la différence des tensions produites par chaque lame, ou

bien, ce qui revient au même, la force électro-motrice totale est la différence des deux forces électro-motrices.

Je désigne la force électro-motrice par E , et je mets entre parenthèses la notation de la combinaison qui développe cette force. Ainsi : E (zinc dans l'acide sulfurique) veut dire force électro-motrice développée par la dissolution du zinc dans l'acide sulfurique. D'après la loi précédente, on aura :

$$E \text{ (zinc dans l'acide sulfurique)} - E \text{ (cuivre dans l'acide sulfurique)}$$

$$= E \text{ (zinc et cuivre plongeant dans l'acide sulfurique)}$$

De là résulte que si l'on connaît la force électro-motrice de deux couples composés de lames plongeant dans un liquide et dans lequel la lame négative de l'une est la lame positive de l'autre, on connaîtra la force électromotrice d'un troisième couple formé par la lame positive du premier et la lame négative du second. Cette dernière sera égale à la somme des deux premières. Ainsi :

$$E \text{ (zinc et cuivre plongeant dans l'acide sulfurique)}$$

$$+ E \text{ (cuivre et platine plongeant dans l'acide sulfurique)}$$

$$= E \text{ (zinc et platine plongeant dans l'acide sulfurique)}.$$

En effet, si nous décomposons la force électro-motrice de chaque couple à deux lames en la différence des forces électro-motrices produites par chacune d'elles, on aura, pour le premier membre de l'égalité précédente :

$$E \text{ (zinc dans l'acide sulfurique)} - E \text{ (cuivre dans l'acide sulfurique)}$$

$$+ E \text{ (cuivre dans l'acide sulfurique)} - E \text{ (platine dans l'acide sulfurique)}$$

$$= E \text{ (zinc dans l'acide sulfurique)} - E \text{ (platine dans l'acide sulfurique)}$$

= E (zinc et platine dans l'acide sulfurique)
ce qu'il fallait démontrer.

Au lieu de faire plonger les deux lames dans un même liquide, on peut les faire plonger dans deux liquides différents et mettre en contact les deux liquides, dont on empêchera le mélange en grande partie en les séparant par un diaphragme poreux qui n'empêche pas leur contact. Dans ce cas, voici comment on devra considérer ce nouveau couple à deux liquides. Supposons, par exemple, un élément Daniell, composé d'une lame de zinc plongeant dans l'eau acidulée, et d'une lame de cuivre dans une dissolution de sulfate de cuivre. Le zinc, en se dissolvant dans l'eau acidulée, s'oxyde et sépare l'hydrogène qui se porte vers la lame de cuivre ; mais, au point de séparation des deux liquides, l'hydrogène agit à son tour comme lame négative, en se dissolvant dans le sulfate de cuivre et en mettant en liberté le cuivre qui se porte sur la lame de cuivre. On a donc, en réalité, deux éléments à deux lames chacun :

- 1^o Zinc et hydrogène plongeant dans l'eau acidulée ;
- 2^o Hydrogène et cuivre plongeant dans le sulfate de cuivre.

La force électro-motrice résultante sera égale à la somme des forces électro-motrices des deux.

Si l'une des lames d'un couple à deux lames et un liquide, en se dissolvant dans le liquide, au lieu de dégager de l'hydrogène, dégageait de l'oxygène, il faudrait considérer sa force électro-motrice individuelle comme négative dans les formules précédentes.

Si l'on réunit plusieurs couples de façon que le pôle positif de chacun soit réuni au pôle négatif du suivant, on forme ce que l'on appelle une pile, et la force électro-motrice est égale à la somme des forces électro-motrices de chaque élément ; de sorte que si tous les éléments sont semblables, la force électro-motrice de la pile sera égale au produit de la force électro-motrice d'un élément par le nombre des éléments. De là un moyen commode de

comparer les forces électro-motrices des éléments. Supposons deux piles composées d'éléments semblables pour une même pile, mais différents dans chacune d'elles ; si les forces électro-motrices sont entre elles comme 7 : 3, en composant la première de trois éléments et la seconde de sept, leurs forces électro-motrices seront égales. De là résultera qu'en opposant pôle à pôle ces deux piles, on ne devra pas obtenir de courant. Donc, en composant par tâtonnement deux piles de chacun des couples considérés de manière qu'elles se fassent équilibre, les forces électro-motrices des couples seront en raison inverse du nombre des éléments des piles dans lesquels ils entrent.

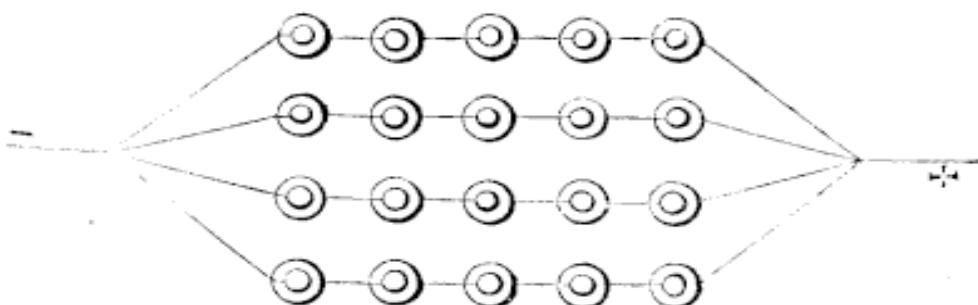
Les corps conducteurs solides opposent au passage du courant une résistance qui est en raison inverse de la section et proportionnelle à leur longueur. Il n'en est pas exactement de même pour les liquides dont la résistance dépend du courant lui-même. Cependant, dans la pratique, la loi précédente est suffisamment exacte pour les liquides pour que nous puissions la leur appliquer.

Quand une pile envoie un courant dans un fil, comme l'électricité est développée au point de contact de chaque lame avec le liquide, il en résulte que la force électro-motrice doit vaincre non-seulement la résistance du fil, mais encore la résistance que le liquide de chaque élément oppose au passage du courant. La section des conducteurs liquides n'est pas ordinairement constante ; aussi, les formules, pour indiquer comment ces résistances dépendent de la forme des éléments, seraient trop compliquées pour les donner ici. Nous nous contenterons de dire que, pour des éléments qui ne diffèrent que par la hauteur, cette résistance est en raison inverse de la hauteur. Dans ce cas, chaque tranche horizontale de l'élément agit comme si elles ne se joignaient que par les électrodes, c'est-à-dire comme si les tranches liquides n'avaient aucune communication entre elles. De là résulte que si nous prenons cinq éléments semblables et que nous réunissions tous les

pôles de même nom entre eux, ce sera comme si on n'avait qu'un seul élément dont la hauteur fût cinq fois plus considérable.

De même en prenant cinq piles, composées d'un nombre quelconque d'éléments et les réunissant par leurs pôles semblables, on aura une pile qui se comportera comme une seule pile composé d'éléments cinq fois plus hauts et ayant le même nombre d'éléments que chaque pile partielle. Si, par exemple, nous indiquons chaque élément par deux cercles concentriques, dont le cercle intérieur sera le pôle positif et l'extérieur le pôle négatif, la pile disposée comme dans la figure 1, agira comme une seule pile composée de cinq éléments, et ayant une hauteur quatre fois plus considérable.

FIGURE 1.



Quand on plonge une lame de zinc et une lame de platine dans l'acide sulfurique, le couple ainsi formé n'a pas une force constante, parce que l'hydrogène mis en liberté par le zinc vient se déposer sur la lame de platine; et alors on n'a plus en réalité une lame de platine pour électrode négatif, mais une lame d'hydrogène. Cet inconvénient n'a pas lieu dans les piles de Daniell, composées d'une lame de zinc plongeant dans l'acide sulfurique étendu ou dans l'eau, et d'une lame de cuivre dans le sulfate de cuivre; car alors ce n'est plus de l'hydrogène qui se dépose sur l'électrode négatif, mais du cuivre, ce qui ne change en rien sa nature. Il en est de même dans la pile de Bunzen, quoiqu'à un moindre degré.

Une seconde cause qui fait varier le courant, c'est l'hétérogénéité de la lame de zinc. Le zinc impur du commerce renferme des grains de fer et de carbone qui forment de petits couples avec le zinc, et alors une action chimique continue a lieu sur cette lame, qui se recouvre de bulles d'hydrogène; il y a donc dépense de zinc en pure perte et variation dans l'état de sa surface. L'amalgamation du zinc, c'est-à-dire la combinaison de la surface du zinc avec du mercure, rétablit l'homogénéité et empêche les actions secondaires dont nous venous de parler. En effet, le mercure ne dissolvant ni le fer ni le charbon, une couche uniforme d'amalgame de zinc se répand sur toute la surface du zinc impur.

On observe qu'une lame de zinc amalgamée ne se dissout pas dans le liquide, tant que le circuit n'est pas fermé et que le courant ne peut s'établir; de plus, une lame de zinc amalgamée et une autre non amalgamée étant toutes deux plongées dans l'acide sulfurique étendu d'eau, la première est l'électrode négatif, c'est-à-dire celui qui se dissout.

Une troisième cause de variation des piles est le changement qu'éprouve le degré de saturation des liquides dont la conductibilité électrique change par cela même. Dans la pile de Daniell, la saturation complète de la dissolution de sulfate de cuivre est entretenue par des cristaux de sulfate que l'on met en excès dans la dissolution.

On voit donc que la pile de Daniell est une pile extrêmement constante, puisque si on amalgame le zinc, toutes les causes de variation du courant y sont supprimées.

Voici un tableau des forces électro-motrices développées par divers couples.

La pile de Grove est une pile composée d'une lame de zinc plongeant dans l'acide sulfurique étendu d'eau et d'une lame de platine plongeant dans l'acide nitrique pur; les deux liquides

sont séparés par un vase poreux en porcelaine non complètement cuite.

La pile de Bunzen ne diffère de la pile de Daniell qu'en ce que le platine est remplacé par du charbon préparé au moyen de poussière de coke et d'une dissolution de matière organique qui, par la chaleur, se décompose et agglutine les diverses parties du coke. Le modèle de Storer, même système, est formé de la même manière, seulement le charbon employé est celui qui se dépose dans les cornues en fer dans lesquelles on distille les substances qui servent à la fabrication du gaz d'éclairage.

La pile de Daniell est connue ; l'électrode négatif est toujours du zinc : il plonge dans de l'eau ou salée, ou acidulée, ou même dans l'eau ordinaire. Son électrode positif est une lame de cuivre plongeant dans du sulfate de cuivre ; ce dernier est ordinairement mis dans un vase poreux de matière quelconque. On peut faire l'inverse et mettre le zinc et son liquide dans le vase poreux. La nature du vase poreux n'influe pas sur la force électro-motrice ; elle n'agit que sur la résistance de la pile et sur la durée d'action à la régularité du couple.

La pile de Smée se compose de deux lames, l'une de zinc amalgamé, l'autre de platine platiné ou d'argent platiné, plongeant toutes deux dans de l'acide sulfurique dilué. On appelle platine platiné ou argent platiné une lame de platine ou d'argent sur laquelle on a fait déposer du platine en poudre : les aspérités de cette poudre facilitent le dégagement de l'hydrogène, et empêchent que l'électrode positif ne se recouvre d'une couche de gaz qui, nous l'avons vu, est préjudiciable à la constance de la pile : c'est ce que l'on appelle la polarisation des lames.

La pile de Wollaston se compose uniquement de deux lames de métal plongeant dans de l'eau acidulée ; celle dont nous donnons la force électro-motrice avait pour électrode négatif une lame de platine.

Force électro-motrice de la pile de Grove.....	82 ⁹
— — — Bunzen (Deleuil).....	83 ⁹
— — — Bunzen (Storer)	77 ⁷
— — — Daniell.....	41 ⁰
— — — Sinée..	21 ⁰
— — — Wollaston	20 ⁸

§ III.

APPLICATION DES PILES A LA TÉLÉGRAPHIE.

La seule pile dont se sert en ce moment l'administration française des lignes télégraphiques, est la pile de Daniell. La lame de zinc n'est pas amalgamée; on a trouvé que la constance ~~et~~ était suffisante sans se donner les embarras de cette préparation. Le vase poreux est en porcelaine dégourdie; on y plonge les cuivres de chaque couple. Cette lame de cuivre, soudée au zinc ~~cor~~ respondant, est quelquefois garnie d'une petite cuvette en cuivre et percée de trous dans laquelle on met les cristaux de sulfate de cuivre qui doivent entretenir la dissolution de ce sel à l'état de saturation complète. Les électrodes de la pile sont de petites lames de cuivre que l'on fait plonger dans le vase poreux auquel ~~o~~ veut établir le fractionnement de la pile. La pile est ordinairement ainsi fractionnée en trois parties. Si la pile se compose de trente éléments, on la divisera souvent en vingt, vingt-cinq et trente éléments : dans ce cas, on mettra une première plaque de cuivre dans le vingtième vase poreux, une deuxième dans le vingt-cinquième et la dernière dans le trentième, si c'est le pôle zinc qui communique avec la terre. Si c'était le pôle cuivre qui fût à ~~l~~

terre, il faudrait mettre ces plaques respectivement dans le vingt et unième, vingt-sixième, trente et unième. On met de l'eau ordinaire dans le vase en verre où plonge le zinc, et qui contient le couple complet.

La pile étant ainsi disposée, le vase poreux ne tarde pas à s'imprégnier de liquide, et le courant peut être établi. Toutefois, pendant les premières heures, le zinc n'est en contact qu'avec de l'eau : aussi le courant qui doit traverser ce liquide y éprouve-t-il une grande résistance; c'est là la cause de la faiblesse des piles nouvellement préparées. Au bout d'un certain temps, le sulfate de cuivre du vase poreux le traverse et vient se mettre en contact avec le zinc; il est décomposé par ce métal et dépose sur lui des parcelles de cuivre, en même temps qu'il sature l'eau de sulfate de cuivre et finit par la rendre meilleure conductrice de l'électricité.

Si l'on veut avoir une pile qui soit immédiatement en état de fonctionner, il faut mettre, dès la veille, les vases poreux dans de l'eau salée avec du sel de cuisine, pour qu'ils s'en imprègnent, et remplir de cette dissolution les vases en verre dans lesquels on fait plonger les zincs. Par ce moyen, la pile sera en état de fonctionner aussitôt qu'elle sera montée.

Les vases poreux doivent avoir un degré déterminé de porosité. Trop peu poreux, ils offrent au courant une trop grande résistance, par suite de la ténuité des filets liquides qui établissent les communications entre les liquides du vase poreux et du vase en verre. S'ils sont trop poreux, ils laissent trop facilement s'établir le mélange des deux liquides. D'une part, il y a rapide usure des cristaux de sulfate destinés à entretenir le liquide du vase poreux à l'état de saturation; d'autre part, le zinc décomposant le sulfate qui a pénétré dans le vase en verre, sans pour cela que la pile soit en activité, il se dépose sur ce métal une boue rougeâtre, mélange de parcelles de cuivre, d'oxyde de cuivre et de sulfate de zinc. Ces parcelles de cuivre font que le zinc, lui aussi,

se dissout continuellement sans utilité pour la production du courant. Un moyen facile de reconnaître si un vase est suffisamment poreux consiste à appliquer la langue contre lui quand il est sec : la langue s'attache légèrement, par suite de la succion du liquide opérée par le vase poreux ; on dit que la langue happe. Cet effet n'aura plus lieu si le vase n'est pas suffisamment poreux. On devra rejeter ceux qui n'auront pas assez de porosité. On devra également rejeter ceux qui en présenteraient une trop grande, ce que l'on reconnaîtra à l'usure rapide des cristaux de sulfate déposés sur la cuvette du cuivre, ou à la rapidité de la décoloration de la dissolution de sulfate de cuivre, quand le vase poreux ne renfermera pas de cristaux de sulfate de cuivre en excès.

Les vases poreux, avec le temps, se couvrent de petits mamelons de cuivre très-pur, qui nuisent à la force de la pile et qui, avec le temps, mettent les vases poreux tout à fait hors de service. Ce sont des parcelles de substances solides conductrices qui renferme la pâte du vase poreux qui établissent une communication électrique entre les deux liquides ; alors l'hydrogène, dégagé dans le liquide du vase en verre, au lieu de traverser le vase poreux, vient se déposer contre la face extérieure de cette partie conductrice, en même temps qu'elle l'électrise positivement : ainsi électrisée, elle décompose le sulfate de cuivre du vase poreux ; quant à l'hydrogène déposé sur la face extérieure, il décompose, comme le zinc, le sulfate de cuivre qui a pénétré dans le vase en verre et se couvre de cuivre. Cet effet ayant lieu sans cesse, le mamelon se forme et va toujours en grossissant. Il faut donc que les vases poreux soient faits avec de l'argile très-pure qui ne contienne pas de pyrites, ce qui, malheureusement, a lieu très-fréquemment.

Les cuivres se rongent fréquemment à la surface du liquide dans lequel ils plongent ; cet effet provient de la dissolution de l'oxygène de l'air par ce liquide, oxygène qui, alors, attaque le

cuivre et le ronge. Il faut donc bien avoir soin de remplacer les cuivres quand cet effet a eu lieu, sans quoi la pile cesserait de fonctionner. La soudure des queues de cuivre avec les zincs se détruit aussi promptement, surtout si cette soudure plonge dans le liquide; car, alors, en ce point, il se forme un couple voltaïque dans lequel le zinc se dissout promptement.

Les vases en verre dans lesquels plongent les zincs se cassent très-facilement par des changements brusques de température; il suffit souvent d'ouvrir une porte pour entendre un ou plusieurs vases en verre se fendre avec un bruit sec très-connu. Ces accidents viennent de ce que ces vases ne sont pas bien recuits; c'est un défaut qui doit être imputé au fabricant. Quand on fabrique un vase quelconque en verre, on souffle une boule à laquelle on donne la forme voulue, soit à la main, soit au moyen d'un moule; dans ces opérations, la surface extérieure du verre, en contact soit avec l'air froid du dehors, soit avec le moule, se solidifie avant la surface intérieure, qui, alors, ne pouvant plus se contracter librement, a ses molécules dans une position forcée; c'est une espèce d'équilibre instable que la moindre circonstance extérieure, un refroidissement inégal dans les parties du verre suffit pour rompre, et alors le vase se brise. Ces vases doivent donc être recuits avec soin, ce qui, malheureusement, a lieu rarement.

Il est aussi nécessaire pour le bon état des piles que le sulfate de cuivre employé soit très-pur. Ordinairement, ce produit renferme du sulfate de fer qui peut donner des dépôts de fer et d'oxyde de fer sur le zinc. Pour reconnaître si une dissolution de sulfate de cuivre en renferme, il faut ajouter en excès une dissolution d'un sel appelé cyanure jaune de potassium. Avec un sel de cuivre qui ne contient pas de fer, le mélange est brun rougeâtre; s'il y a du fer, cette teinte se trouve altérée par la présence du bleu de Prusse.

Nous avons vu que la présence du sulfate de cuivre dans le li-

quide où se trouve le zinc était nuisible à la constance de la pile et à la durée de ses éléments. L'introduction de ce sel n'a pas lieu seulement à travers le vase poreux, mais encore par-dessus ses bords, sous forme d'efflorescence. Quand un corps poreux plonge dans un liquide, le liquide monte dans ce corps au-dessus de son niveau; mais, alors, au-dessus du liquide, il offre une grande surface à l'air ambiant, il se dessèche et laisse déposer une couche du sel qu'il tient en dissolution, et cette couche va sans cesse en augmentant. Pour détruire cet effet, on a essayé de vernir la partie supérieure du vase poreux; mais, tout en retardant le dépôt d'efflorescence cristalline, ce vernis ne l'arrête pas complètement, à cause de l'attraction que les substances vitreuses exercent sur les liquides, action qui les fait monter le long des parois: aussi faut-il avoir soin d'enlever ces efflorescences quand elles se forment. On peut encore retarder le développement de ce dépôt en graissant avec du suif la partie vernie du vase poreux, ce qui détruit l'action des substances vitreuses sur les liquides.

Quel est le nombre d'éléments de pile dont on doit se servir? Cette question ne peut être résolue d'une manière absolue, car on risquerait d'employer un nombre d'éléments trop considérable pour pouvoir être employés pratiquement. En effet, nous avons vu que la force électro-motrice d'une pile était égale à la force électro-motrice d'un élément multipliée par le nombre des éléments :

$$E = n \cdot e.$$

E représentant la force électro-motrice de la pile, e celle d'un élément et n le nombre de ces éléments. La même loi existe pour les résistances, et on a :

$$R = n \cdot r.$$

R étant la résistance de la pile, r celle d'un élément et n toujours le nombre de ces éléments. Quant à l'intensité du courant fourni par cette pile, si elle a à vaincre de la part du conducteur la résistance L , on aura, en appelant I l'intensité du courant :

$$I = \frac{n \cdot e}{n \cdot r + L}$$

On voit par là que I va toujours en croissant avec n , car le numérateur croît plus que le dénominateur; mais à mesure que n devient plus grand, son augmentation influe de moins en moins sur l'accroissement de I , à partir d'une certaine limite; il sert donc peu d'augmenter le nombre des éléments. Mais alors il reste une autre ressource, c'est de diminuer la résistance de ces éléments en augmentant leur hauteur. Si nous supposons que cette hauteur augmente avec le nombre des éléments, la résistance de la pile reste constante; car si r est la résistance d'un élément, en doublant sa hauteur et prenant une pile de deux de ces éléments, la résistance de chacun d'eux est diminuée de moitié, ou est $\frac{r}{2}$ et la résistance de la pile est de $2 \frac{r}{2} = r$. De même pour trois éléments trois fois plus hauts, elle serait $3 \frac{r}{3} = r$, et ainsi de suite. Dans ce cas, l'intensité du courant fourni par n éléments n fois plus hauts ou n fois moins résistants serait :

$$I = \frac{n \cdot e}{r + L}$$

C'est-à-dire que cette intensité serait proportionnelle au nombre des éléments. D'où résulte cette loi : si la hauteur des éléments employés croît avec le nombre des éléments, l'intensité du courant est proportionnelle au nombre des éléments.

Nous avons vu qu'en accouplant m éléments, zinc avec zinc, cuivre avec cuivre, ou en réunissant m piles d'un même nombre d'éléments n , le résultat était le même que si on multipliait la hauteur des éléments par m ; donc, des éléments étant donnés, pour avoir une intensité de courant proportionnelle à n , il faudra prendre n piles de n éléments accouplés par leurs pôles semblables.

On peut se poser une nouvelle question: étant donnée une hauteur H de zinc, combien d'éléments faudra-t-il faire avec ce zinc pour avoir le courant le plus grand possible? Si n est ce nombre d'éléments, R étant la résistance de l'élément qui a une hauteur H , la résistance d'un de ces éléments de hauteur $\frac{H}{n}$ sera nR et la résistance des n éléments sera $n \times n \times R = n^2 R$; donc l'intensité du courant sera :

$$I = \frac{n \cdot e}{n^2 R + L}$$

Or le calcul indique que pour que cette quantité soit la plus grande possible, il faut que $n^2 R = L$, c'est-à-dire que la résistance de la pile soit égale à la résistance que l'on doit vaincre.

Je vais terminer en indiquant les noms des diverses parties d'une pile.

L'élément ou couple est l'ensemble des pièces qui fournissent le courant.

Une pile est la réunion de plusieurs éléments qui peuvent être reliés en surface ou en force; en surface, quand ils sont réunis par leurs extrémités semblables; en force, quand ce sont leurs extrémités dissemblables.

Les pôles d'une pile sont les plaques extrêmes.

Les électrodes sont les fils attachés aux pôles.

Errata du cahier précédent :

- Page 8, ligne 20 : *hydrogène* a été mis pour *oxygène*.
 11, — 19 : *mis* — pour *unis*.
 16, — 15 : *rotation* — pour *notation*.

CHAPITRE II.

DES COURANTS ÉLECTRIQUES.

§ 1^{er}.

ACTIONS MAGNÉTIQUES DES COURANTS, LEUR MESURE.

Lorsque les deux pôles d'une pile sont réunis au moyen de certains corps, tels que les métaux, beaucoup de sulfides ou sulfures, certains charbons, les électricités de nom contraire développées aux pôles de la pile se réunissent par l'intermédiaire de ces corps pour reformer le fluide neutre ; ces corps sont alors sans cesse traversés par un flux d'électricité positive et négative : c'est ce qui constitue le courant électrique. Il y a donc un double courant, courant d'électricité négative qui part du pôle négatif pour se rendre au pôle positif, et réciproquement courant d'électricité positive qui va du pôle positif au négatif. Ces deux courants sont de sens contraire ; c'est le dernier, c'est-à-dire le courant d'électricité positive, qui, par son sens, détermine celui du courant total. Donner un sens au courant total ne veut pas dire autre chose que déterminer sur une direction donnée la position relative des deux pôles de la pile.

Certains corps jouissent de la propriété d'attirer la limaille ou les morceaux de fer ; ces corps sont ce que l'on appelle des aimants. Les uns sont naturels, ce sont des oxydes de fer ; les autres sont artificiels ; on les produit avec de l'acier au moyen

de divers procédés qui sont indiqués dans la partie théorique du cours. Si l'on donne à un aimant la forme d'une tige ou barreau, et qu'on le suspende par son centre de gravité, c'est-à-dire par le point autour duquel le barreau sollicité par sa pesanteur seule serait en équilibre quelle que soit sa position, on verra cet aimant se diriger à peu près du nord au sud. Si l'on prend un second barreau et que l'on fasse la même expérience, en ayant soin de marquer dans la première opération, comme dans la seconde, du signe — le côté qui se dirige vers le nord et par le signe + celui qui se dirige vers le sud, on verra les deux bouts de même signe se repousser, et ceux de signe contraire s'attirer quand les deux barreaux seront mis à proximité suffisante l'un de l'autre. De ces expériences on conclut que ces barreaux ont deux centres d'action ou pôles jouissant de propriétés contraires, ou bien, si l'on veut, ont deux pôles différents ; on en conclut aussi que la terre peut être considérée comme un aimant ayant aussi deux pôles, l'un placé à peu près au nord et l'autre à peu près au sud. On donne à l'un le nom de pôle sud, et à l'autre le nom de pôle nord. Comme les pôles de même nature se repoussent et que ceux de nature contraire s'attirent, le pôle d'un barreau qui est attiré par le pôle nord de la terre sera le pôle sud du barreau, et réciproquement le pôle nord du barreau sera celui qui se dirigera vers le pôle sud ou austral du globe terrestre. La ligne qui joint les pôles d'un aimant est son axe magnétique ; tout plan passant par l'axe est un méridien magnétique ; tout plan perpendiculaire à cet axe est un parallèle, et le parallèle situé à égale distance des deux pôles est le plan équatorial. On peut alors admettre pour le barreau, comme pour la terre, un orient et un occident, de même qu'il y a un nord et un sud. On détermine l'orient et l'occident de l'aiguille en la plaçant verticalement devant soi, le nord en haut et le sud en bas ; l'orient est à droite et l'occident à gauche.

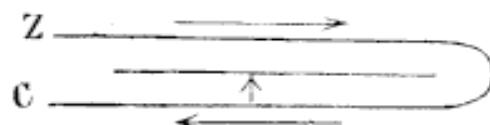
Lorsqu'un aimant attire un morceau de fer, il détermine dans ce métal une séparation des forces magnétiques contraires qui à l'état naturel sont réunies et s'annulent ; le magnétisme nord ou boréal est repoussé par le pôle nord et attiré par le pôle sud ; également le magnétisme sud ou austral est attiré par le pôle nord et repoussé par le pôle sud. La présence d'un aimant en regard d'un morceau de fer détermine donc dans ce dernier deux centres d'actions magnétiques contraires ou pôles dont la position dépend et de la forme du fer soumis à l'action de l'aimant et de la position relative des pôles de ce dernier. Quand deux aimants placés en présence ne peuvent modifier leur magnétisme réciproque, les actions attractives et répulsives ont lieu suivant la loi habituelle des actions naturelles, c'est-à-dire en raison directe des forces mises en présence et en raison inverse du carré des distances. Mais s'il peut y avoir modification du magnétisme de tous deux ou même de l'un d'eux, comme cela a lieu lorsqu'on fait agir un aimant sur du fer doux, la loi est beaucoup plus compliquée et dépend de l'intensité magnétique, de la forme et de la nature magnétique des corps mis en présence.

Oersted a découvert l'action réciproque qu'un courant électrique et un barreau aimanté exercent l'un sur l'autre. Si le courant a la forme d'une portion de ligne droite, le barreau aimanté tendra à occuper une position perpendiculaire au courant, de manière que les pôles soient placés de telle sorte que le courant marche de l'orient du barreau à son occident, ou de gauche à droite si le pôle nord est considéré comme la tête de l'aimant et le pôle sud comme le pied. De là résulte donc que si la position relative du courant et celle de l'aiguille restent les mêmes, mais que le sens du premier soit renversé, l'action réciproque ne changera ni de direction ni d'intensité, mais seulement de sens. Il en

serait de même si, le courant ne changeant pas, le barreau avait ses pôles renversés. Comme conséquence de ces deux lois, résulte la permanence de cette action en grandeur, direction et sens, bien que le courant change de direction, pourvu qu'en même temps l'aiguille ait ses pôles renversés.

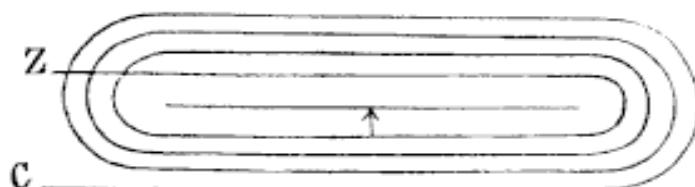
De la loi qui régit cette action réciproque du courant rectiligne et de l'aiguille aimantée mobile dans un plan parallèle au courant, résulte encore l'égalité de l'action en grandeur et en direction, et la similitude de son sens pour deux courants qui occupent une position symétrique en dessus et en dessous du plan dans lequel se meut l'aiguille. D'où l'on voit que si, comme l'indique la figure ci-jointe, où les flèches indiquent le sens du courant, on replie le conducteur au-dessous de l'aiguille, l'action

FIGURE 2.



du courant sera double de ce qu'elle eût été si le courant n'eût passé qu'en dessous ou en dessus; et que si l'on entoure ainsi l'aiguille plusieurs fois, comme dans la fig. 3, on pourra consi-

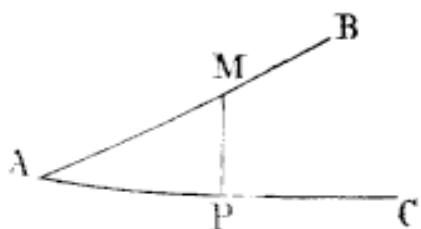
FIGURE 4.



dérer l'action totale comme proportionnelle au nombre de circonvolutions que le courant fait autour de l'aiguille. Tel est le principe sur lequel est basée la construction des divers appareils qui servent à mesurer les courants au moyen de l'action qu'ils

exercent sur l'aiguille aimantée. Cette disposition a pour but de multiplier cette action de façon à la rendre appréciable quelque faible qu'elle soit.

L'action d'un courant rectiligne sur une aiguille qui ne lui est pas parallèle varie avec l'angle qu'ils font entre eux ; la loi en est assez compliquée : aussi, à moins d'avoir d'avance une table qui donne les valeurs correspondant à chaque angle, doit-on faire en sorte d'établir le parallélisme de l'aiguille et du courant, ou au moins d'en rendre l'angle constant, afin d'obtenir la constance de l'action magnétique elle-même. Quand une aiguille horizontale est laissée libre de toute action de courant, elle prend une direction qui lui est imprimée par l'action magnétique du globe terrestre ; cette direction est celle du méridien magnétique du lieu où se trouve l'aiguille : si un courant agit sur cette aiguille de manière à lui faire abandonner cette direction, l'aiguille s'arrêtera quand il y aura équilibre entre l'action directrice de la terre et l'action directrice du courant. Quand l'aiguille est dans le méridien magnétique, la composante de l'action terrestre dirigée perpendiculairement à l'aiguille, c'est-à-dire la seule susceptible de la faire mouvoir, est nulle, et à mesure que l'aiguille s'écarte de cette position, cette composante augmente et cela proportionnellement au sinus de l'angle de déviation ; enfin quand cet angle devient égal à 90°, la force directrice de la terre agit tout entière pour ramener l'aiguille à sa position méridienne (1). Il résulte de là que la force déviatrice du cou-



(1) Si l'on prend un point M, par exemple, sur un des côtés AB d'un angle BAC, ce point est distant du sommet A de l'angle d'une longueur MA : pour mesurer la distance de ce même point au côté opposé AC, on abaisse

rant qui fait équilibre à la force directrice de la terre sera proportionnelle au sinus de la déviation ; mais cette force déviatrice n'est proportionnelle elle-même à l'intensité du courant qu'autant que le courant est ramené à avoir, par rapport à l'aiguille, une position constante, comme elle a lieu dans les appareils nommés boussoles de sinus.

Il existe donc pour mesurer les courants deux espèces d'appareils employés en télégraphie. Ils sont désignés dans la nomenclature sous le nom de boussoles de sinus et de galvanomètres. Nous en donnerons la description dans ce paragraphe.

une perpendiculaire MP , dont la longueur mesure cette distance. Le rapport de ces deux $\frac{MP}{MA}$ distances est constant pour tous les points du côté AB ; c'est encore le même rapport qui existe entre les distances des divers points du côté AC au sommet d'une part, et au côté AB de l'autre. Ce rapport, constant pour tous les points des deux côtés de l'angle, est caractéristique de cet angle, c'est-à-dire que ce rapport étant donné, l'angle se trouve déterminé par cela même, on le nomme sinus de cet angle. Le sinus sera égal à la perpendiculaire MP , quand la distance AM est égale à l'unité. Ainsi, le sinus est, soit le rapport des distances des points d'un côté de l'angle au sommet d'une part, et à l'autre côté de l'autre, soit la perpendiculaire abaissée sur le côté opposé d'un point pris sur l'autre côté, à une distance du sommet égale à l'unité.

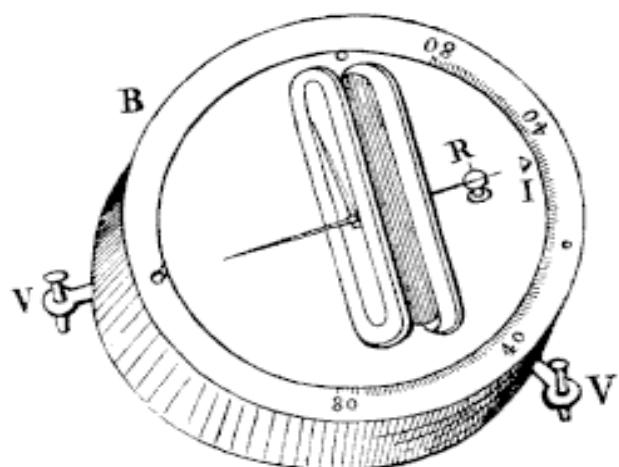
La circonférence du cercle se divise en 360 parties appelées degrés, qui mesurent la 360^e partie de quatre angles droits ; c'est un petit angle qui porte aussi le nom de degré. Un angle droit a 90°. Le degré se divise en 60 parties ou minutes, qui se marquent par une ' placée à droite du nombre des minutes qu'on veut désigner. La minute se divise en 60 secondes, dont le signe est ".

Il existe des tables qui donnent les sinus des divers angles, et réciproquement les angles correspondant aux divers sinus. Les sinus et les arcs ou angles peuvent, sans erreur sensible pour les opérations télégraphiques, être pris les uns pour les autres jusqu'aux 30 premiers degrés.

Les premières donnent les sinus de l'intensité du courant, et les seconds ne donnent ces intensités qu'au moyen de tables.

La boussole des sinus se compose d'une bobine de forme aplatie à laquelle on donne le nom de cadre. Le fil recouvert de soie s'enroule autour du cadre, et l'aiguille aimantée se place dans la fente allongée qui existe au milieu de la bobine. Au centre de l'aiguille est une crapaudine en agate, qui lui permet de tourner autour d'une pointe en acier. Cette pointe se trouve fixée au centre du cadre. L'aiguille aimantée est cachée par le cadre : aussi, afin d'apprécier sa position, on a été obligé d'y fixer

FIGURE 4.



une aiguille perpendiculaire en cuivre que l'on appelle aiguille indicatrice. Le cadre est fixé sur un plateau circulaire mobile autour de son centre ; il porte un repère R qui sert à ramener le cadre dans une position fixe par rapport à l'aiguille, et une pointe en cuivre qui sert d'indicateur. Ce plateau tourne au moyen d'un axe dans une cavité circulaire pratiquée dans un second plateau qui sert de support à l'appareil ; le bord intérieur de la cavité pratiquée dans ce support est divisé en degrés, et la pointe qui sert d'indicateur au premier plateau vient indiquer par sa posi-

tion sur ces diverses divisions le nombre de degrés dont ce plateau a été tourné. Un petit bouton fixé sur le premier plateau permet de le faire tourner à la main. Enfin, trois vis calantes V, fixées à un trépied, permettent de mettre l'appareil de niveau.

Quand on se sert de cet appareil, le premier soin à prendre est de l'orienter, c'est-à-dire de le fixer dans une position telle, que le courant ne passant pas, l'aiguille indicatrice se trouve au-dessus du repère, et l'indicateur au 0° des divisions. On commence par tourner, au moyen du bouton B, le premier plateau à la main, de façon à remplir cette dernière condition. On prend ensuite le plateau extérieur avec les deux mains, et on le fait tourner jusqu'à ce que l'aiguille indicatrice soit à peu près sur son repère : on pose alors la boussole sur la table et, au moyen des vis calantes, on la met de niveau de manière que l'aiguille soit bien parallèle aux faces horizontales du cadre, et ait par cela même toute la mobilité qu'elle peut avoir. On achève alors l'orientation de la boussole en la tournant avec les mains, et on rétablit la stabilité, si elle a été un peu altérée, par le moyen des vis calantes. Pour mesurer un courant, on rompt le circuit et on introduit les deux électrodes que fournit cette rupture dans deux boutons que n'indique pas la fig. 4, et qui communiquent avec les extrémités du fil de la boussole. Le courant passant dans ce fil, dévie l'aiguille aimantée, et par suite l'aiguille indicatrice, qui quitte son repère. On fait alors tourner le cadre et le plateau intérieur au moyen du bouton B, jusqu'à ce que le repère soit de nouveau venu se placer sous l'aiguille indicatrice ; alors la déviation indiquée par l'indicateur du plateau I se trouve être celle de l'aiguille, et son sinus est proportionnel à la force avec laquelle le courant a dévié l'aiguille du méridien magnétique ; car cette force fait équilibre à celle avec laquelle l'action terrestre tend à faire tourner l'aiguille, et nous avons vu qu'elle est proportionnelle au

sinus de la déviation de cette aiguille. Comme le cadre occupe une position constante par rapport à l'aiguille, quand on mesure la déviation, il en résulte que la seule chose qui fasse varier l'action du courant sur l'aiguille est son intensité. L'intensité du courant lui-même est donc proportionnelle au sinus de la déviation. Il est à remarquer que le magnétisme de l'aiguille aimantée peut varier sans que les indications de la boussole cessent d'être exactes. En effet, si d'une part l'action terrestre est proportionnelle au magnétisme de l'aiguille, de l'autre, l'action du courant est également proportionnelle à cette quantité : donc, si ces deux actions se faisaient primitivement équilibre, elles continueront à le faire après que le magnétisme de l'aiguille aura changé.

Dans les galvanomètres il n'y a pas de plateau ; le cadre est posé directement sur le plateau fixe, et l'aiguille indicatrice, en se plaçant sur les divisions qui y sont tracées, indique elle-même la déviation. Mais le cadre n'occupe pas une position constante par rapport à l'aiguille déviée, en sorte que l'action du courant varie avec la déviation. La loi qui détermine la relation entre l'intensité du courant et la déviation produite est très-compliquée ; néanmoins pour les vingt premiers degrés il y a proportionnalité entre l'angle de déviation et l'intensité du courant ; au delà de vingt degrés, il faut construire une table qui donne l'intensité correspondante à chaque degré. Voici comment on peut établir cette table : on fait passer un même courant variable, à la volonté de l'opérateur, dans une boussole de sinus et dans le galvanomètre ; on note en regard les uns des autres les degrés obtenus dans les deux appareils, et comme ceux de la boussole donnent par leurs sinus les intensités du courant variable, on a en regard les degrés du galvanomètre et les intensités correspondantes du courant. Cette opération peut se faire sans l'interven-

tion d'une boussole de sinus et au moyen du galvanomètre lui-même; c'est en outre un moyen peu commode, il est vrai, mais praticable, de faire servir le galvanomètre comme boussole de sinus.

Supposons qu'au lieu d'orienter le galvanomètre, c'est-à-dire de le tourner de façon que l'aiguille soit au zéro pendant que le courant ne passe pas, on l'oriente pendant le passage du courant; le courant agissant dans une position fixe par rapport à l'aiguille, est proportionnel à cette action, qui contre-balance celle de la terre sur l'aiguille aimantée; or, comme cette dernière est proportionnelle au sinus de l'angle dont l'aiguille a été déviée par rapport au méridien, il s'ensuit que l'intensité du courant sera proportionnelle au sinus de cet angle qu'il s'agit d'évaluer. Cet angle s'évalue facilement, car il suffit d'interrompre le courant pour que l'aiguille reprenne la position méridienne, et alors on lira, sur le cercle divisé, l'angle existant entre cette position de l'aiguille non influencée par le courant et celle qu'elle avait quand le courant agissait. On voit donc que pour faire servir le galvanomètre de boussole de sinus, il suffira de faire l'inverse de ce qui se fait habituellement, c'est-à-dire d'orienter la boussole quand le courant passe, et de lire la déviation quand il n'existe plus. Pour graduer le galvanomètre, on voit qu'il suffira donc d'avoir un courant dont la variation ne dépende que de la volonté de celui qui opère, de le faire passer à diverses intensités dans le galvanomètre, et de le mesurer en se servant successivement de cet instrument comme boussole de sinus et comme galvanomètre. Une telle opération peut être utile dans certains cas. Dans les galvanomètres, l'action du courant et celle de la terre sur l'aiguille étant toutes deux proportionnelles à l'intensité du magnétisme de cette dernière, les variations de cette force n'ont pas d'influence sur la mesure du courant.

Au lieu d'avoir un galvanomètre horizontal, on le met quelquefois verticalement, comme cela a lieu dans le galvanomètre de Reid; dans ce cas on augmente beaucoup l'action du courant sur l'aiguille en multipliant le nombre des tours que le fil conducteur fait sur le cadre, et on remplace l'action terrestre, qui serait trop faible, soit par un petit aimant fixe qui agit sur l'aiguille, soit par un léger contre-poids. Ces dispositions ne permettent pas de se servir du galvanomètre comme de boussole de sinus, et leurs tables d'intensité ne peuvent être établies qu'au moyen d'une deuxième boussole. De plus, dans le galvanomètre à contre-poids, la variation d'intensité du magnétisme a une influence marquée sur les résultats qu'on obtient; car la force de rappel de l'aiguille étant un contre-poids est constante, tandis que l'action du courant est proportionnelle au magnétisme de l'aiguille; c'est un très-grave inconvénient, vu qu'il est impossible d'avoir des aiguilles dont le magnétisme ne varie pas. Du reste, les galvanomètres ne sont guère employés dans les postes que comme galvanoscopes, c'est-à-dire comme des instruments destinés à constater le passage du courant sans en indiquer l'intensité ou au moins en ne l'indiquant que d'une manière très-peu exacte.

Deux galvanomètres ou deux boussoles de sinus ne donneront la même déviation pour le même courant qu'autant qu'ils seront construits dans des conditions exactement pareilles; c'est ce que l'on s'efforce de faire dans les appareils des postes, et comme d'ailleurs ils n'ont pas besoin d'être d'une exactitude très-rigoureuse, on peut assez facilement remplir cette condition. Mais si les indications à transmettre sont données par un instrument dont la construction n'est pas faite d'après les dimensions réglementaires, ou si l'on veut avoir une grande approximation, auquel cas les appareils ne peuvent être construits de dimensions suffisamment

semblables pour que les indications qu'ils donnent soient identiques, il devient nécessaire de les comparer à un appareil qui donne, quelles que soient ses dimensions, des indications toujours les mêmes. Cet appareil est le voltamètre dont nous avons parlé; le courant est employé à décomposer un composé chimique, et c'est la quantité du corps ainsi décomposé dans un temps déterminé qui donne l'intensité du courant. Le voltamètre employé à cet usage est celui dans lequel les deux électrodes sont deux lames de cuivre, et l'électrolyte ou le corps décomposé est une dissolution saturée de sulfate de cuivre. L'un des électrodes se dissout et du cuivre se dépose sur l'autre : l'accroissement en poids de ce dernier, pendant l'unité de temps qui est égal à la perte de l'autre, mesure l'intensité du courant qui passe. On prend ordinairement pour unité de courant celui pour lequel un gramme de cuivre est pendant une minute la perte subie par un des électrodes et le gain fait par l'autre. Pour étalonner un appareil destiné à mesurer un courant ou rhéomètre, on fait passer un courant d'intensité convenable à travers cet instrument et un voltamètre à sulfate de cuivre, et on le maintient constant pendant un temps suffisamment long, évalué en minutes. D'une part, le rhéomètre indiquera pour le courant une intensité I en unités à lui propres, d'autre part la perte ou le gain d'un électrode sera P en grammes : $\frac{P}{T}$ sera l'intensité du courant en unité indiquée plus haut, d'où $\frac{P}{T}$ sera le coefficient du rhéomètre en question, c'est-à-dire qu'il faudra multiplier par ce coefficient les nombres qu'il donne pour avoir l'intensité du courant en unité conventionnelle généralement adoptée pour les courants électriques.

§ 2.

LOIS DES COURANTS ÉLECTRIQUES - DISTRIBUTEURS ET RÉGULATEURS DES COURANTS ÉLECTRIQUES.

L'intensité de courant que fournit une pile donnée diminue avec la longueur d'un même fil de section constante que doit parcourir ce courant. Ce fait se remarque facilement en intercalant une boussole dans le circuit. On remarque, en outre, que cette intensité est en raison inverse de la longueur du fil qu'on lui donne à parcourir, augmentée d'une quantité constante : on peut admettre que chaque partie du fil offre la même résistance et que toutes ces résistances s'ajoutent entre elles, en sorte que *la résistance qu'un fil oppose au courant est proportionnelle à sa longueur*. La quantité constante à ajouter à la résistance du fil, pour avoir une quantité qui soit en raison inverse de l'intensité du courant, est alors la résistance des diverses parties autres que le fil en question et qui constituent le circuit.

Un fil d'une longueur donnée et d'une section ou grosseur également donnée, peut être remplacé par un fil de même nature, de même longueur et de même section, mais de forme différente, sans que le courant change d'intensité. *La forme de la section d'un fil conducteur n'a donc aucune influence sur la résistance qu'il oppose au courant.*

Un fil d'une section donnée et de longueur donnée peut, sans qu'il y ait changement dans le courant, être remplacé par un fil de même nature, mais de section différente, pourvu que la longueur soit avec celle du premier fil dans le même rapport que les sections; d'où résulte que *la résistance qu'oppose un fil au passage du courant est en raison inverse de la section.*

On peut remplacer un fil d'une certaine nature par un fil de nature différente, pourvu que les rapports de la longueur à la section soient pour les deux fils en une proportion déterminée par la nature des deux conducteurs. *La résistance d'un fil aux courants électriques dépend donc de sa nature.*

En prenant pour unité la résistance qu'offre un fil de nature donnée, on a pu comparer entre elles les résistances offertes par la nature du conducteur; on a ainsi obtenu les résultats suivants :

Argent	100,000
Cuivre.	91,439
Platine.	8,147
Laiton.	4,483
Fer	12,246
Plomb.	10,547

Si nous appelons s la section du fil, l sa longueur, r son coefficient de résistance dépendant de sa nature, on aura pour la valeur R de sa résistance.

$$R = \frac{rl}{s}.$$

On compare ordinairement la résistance d'un fil à celle d'un autre fil de nature, de longueur et de dimensions fixées convenablement et qui sert d'unité. L'unité de résistance adoptée par l'administration télégraphique est le kilomètre du fil de fer de quatre millimètres de diamètre. L'unité la plus convenable pour les recherches scientifiques serait celle du mercure, seul métal qu'on puisse obtenir identique à lui-même, et qu'on renfermerait dans un tube calibré. Quand on rapporte ainsi toutes les résistances à celles d'un fil étalon, les longueurs de ce dernier qui représentent ces résistances en sont appelées les *longueurs réduites*.

On constate, au moyen des boussoles, que *lorsque deux conducteurs se présentent au passage d'un courant, il se bifurque, et les portions qui passent dans chacun d'eux sont en raison inverse de ces resistances.* On peut remplacer, quant à la résistance qu'il offre au courant, un conducteur ainsi double dont les longueurs réduites sont l_1 et l_2 par un conducteur unique dont la longueur réduite l est donnée par la formule

$$l = \frac{l_1 l_2}{l_1 + l_2}$$

Il est très-facile de trouver cette formule par le raisonnement ; en effet, le fil de longueur réduite l peut être remplacé par un fil de la nature du fil étalon dont la longueur serait l'unité, et la section

$$s_1 = \frac{s}{l_1}$$

s étant la section de ce fil étalon, car la longueur réduite d'un tel fil est :

$$\frac{1}{s_1} = \frac{s}{s_1} = l_1$$

De même le second fil de longueur réduite l_2 peut être remplacé par un fil de longueur l et de section s_2 donnée par la formule

$$s_2 = \frac{s}{l_2}$$

Les deux conducteurs ayant même longueur, et la forme de la section n'ayant aucune influence sur la conductibilité, on ne changera rien au courant en réunissant entre eux les deux fils, mais alors sa longueur étant toujours l , sa section sera $s_1 + s_2$, d'où sa longueur réduite sera :

$$\frac{1}{s_1 + s_2} = \frac{s}{s_1 + s_2} = \frac{s}{\frac{s}{l_1} + \frac{s}{l_2}} = \frac{l_1 l_2}{l_1 + l_2}$$

Pour trois conducteurs on trouverait toujours que le courant se partage en raison inverse des longueurs réduites de chacun d'eux. Quant à la longueur réduite du tout, elle se trouverait en cherchant la longueur réduite de deux conducteurs, et ensuite la longueur réduite de cette dernière et du dernier conducteur. On trouve ainsi

$$l = \frac{l_1 l_2 l_3}{l_1 l_2 + l_1 l_3 + l_2 l_3}.$$

On opérerait de même pour un plus grand nombre de conducteurs.

Ces lois vont permettre de déterminer la résistance des piles ou d'une portion quelconque du circuit. Cherchons d'abord à déterminer la résistance des conducteurs. De même que l'on a des poids de dimensions diverses pour peser les corps, il faut aussi avoir des résistances connues de diverses grandeurs auxquelles on puisse comparer les résistances inconnues que l'on veut mesurer ; nous allons indiquer comment on peut composer ces résistances étalons. Il faut avoir d'abord le moyen de comparer deux résistances pour voir si elles sont égales entre elles : pour cette opération, une boussole ordinaire suffit, si l'on a une pile suffisamment constante ; on compose un circuit d'une pile, de la boussole et de l'une des résistances, et l'on observe le nombre de degrés que donne la boussole, puis on substitue à la résistance que l'on vient d'intercaler, la deuxième résistance. Si le courant est plus fort dans le deuxième cas que dans le premier, c'est que la deuxième résistance est moindre que la première. Si, au contraire, le courant est plus faible, c'est l'inverse qui a lieu.

Si la pile n'était pas suffisamment constante et que l'on voulût apporter dans l'opération une grande exactitude, on devrait se servir d'une boussole ou d'un galvanomètre à deux fils

que l'on appelle boussole ou galvanomètre différentiel; c'est une boussole ou un galvanomètre fait comme les instruments ordinaires, seulement on entoure le cadre de deux fils exactement semblables, en sorte que le courant a deux boutons d'entrée, un pour chaque fil, et deux boutons de sortie. Comme ces deux fils sont enroulés en même temps sur le cadre, deux courants de même sens s'ajouteraient pour agir sur l'aiguille, si les deux bouts de fils voisins venaient s'attacher aux deux boutons d'entrée. Pour que leurs actions se retranchent l'une de l'autre et que la différence devienne nulle quand les courants sont égaux, il faudra attacher les deux bouts voisins, l'un à un bouton d'entrée, l'autre à un bouton de sortie, de sorte que les courants de même sens auront une marche inverse dans les deux fils, l'un sortant par où l'autre entre, et réciproquement.

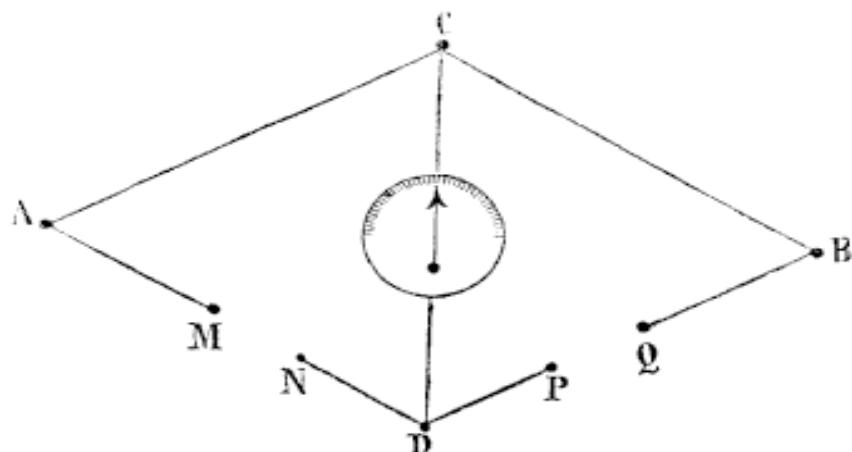
Une boussole étant ainsi constituée, si l'on attache les deux résistances à essayer, d'une part à un des pôles de la pile, et de l'autre séparément à chacun des boutons d'entrée de la boussole, l'autre pôle de la pile, se bifurquant pour se relier aux deux boutons de sortie, on voit, d'après la loi qui régit la distribution du courant dans les conducteurs bifurqués, que le courant se partagera entre les deux fils de la boussole en raison inverse des résistances qu'il aura à vaincre dans chacun des deux parcours. Comme les deux fils du galvanomètre sont égaux, si l'une des résistances ajoutées est plus grande que l'autre, le courant qui la traverse sera moindre et l'aiguille sera déviée; mais si elles sont égales, l'aiguille ne bougera pas. Il faut, pour pouvoir bien comparer dans ce cas les résistances, qu'elles ne soient pas très-faibles par rapport aux résistances des fils du galvanomètre; c'est pour cette raison que l'on construit des galvanomètres différentiels, à gros et à petits fils.

En effet, si ces résistances étaient trop faibles, les courants se-

raient égaux, bien qu'il puisse y avoir une différence du simple au double entre les deux résistances; car le rapport de deux quantités ne diffère que peu de l'unité, si la différence des deux termes est faible par rapport à eux; ainsi: $\frac{1002}{1001}$ ne diffère de $\frac{1001}{1001}$ que de $\frac{1}{1001}$, et cependant la quantité ajoutée à 1000 est, dans un cas, double de ce qu'elle est dans le second. Avec le galvanomètre différentiel, plus la pile sera forte, mieux on apercevra les différences des deux résistances, car plus la valeur de la différence des deux courants sera considérable.

Au lieu d'employer un galvanomètre différentiel, on peut servir d'un appareil que l'on peut construire partout avec quelques bouts de fil: c'est le parallélogramme connu sous le nom de Wheatstone.

FIGURE 5.



On plie en forme de parallélogramme, sur une planche, un fil conducteur ABCD, on enlève deux petites portions égales MN, PQ de deux côtés adjacents du parallélogramme et l'on visse aux points A, B, C, D, M, N, P, Q, de petites bornes en cuivre en contact métallique avec le fil. Les bornes C et D servent à fixer les deux bouts du fil d'un galvanomètre ou d'une boussole que l'on place

au centre du parallélogramme ; les deux pôles d'une pile sont attachés aux boutons A et B, et enfin les deux résistances à comparer sont fixées par leurs extrémités, l'une aux boutons M et N, l'autre aux boutons P et Q. Le courant de la pile partant d'un des pôles A, par exemple, pourra suivre quatre voies pour se rendre au pôle B :

- 1^o AC et CB sans traverser la boussole ;
- 2^o AD et DB, plus les deux résistances placées en MN et PQ, toujours sans traverser la boussole ;
- 3^o AC, la boussole, dans le sens CD, DB, plus la résistance placée en PQ ;
- 4^o AD, plus la résistance placée en MN, la boussole dans le sens DC, enfin CB.

Le courant se partagera entre toutes ces voies en raison inverse de leurs résistances ; les deux premières ne comprennent pas le fil de la boussole, par suite les courants qui les traversent n'agissent pas sur elle ; quant aux deux dernières, elles comprennent toutes deux le fil de la boussole, mais les courants qui les traversent passent dans ce fil en sens inverse, l'un suivant CD, l'autre suivant DC, et leurs effets se différencient. Les courants qui traversent ces deux dernières voies sont en raison inverse de leurs résistances. Or les parties AD, DC et CD, DB étant égales, les seules parties qui peuvent troubler l'équilibre sont les résistances intercalées en MN et PQ ; si donc ces résistances sont égales, la boussole ne bougera pas ; mais si elles sont inégales, l'aiguille en sera déviée dans un sens ou dans l'autre. La grosseur des fils et la résistance de la pile n'ont aucune influence sur la sensibilité de l'appareil ; mais il y a avantage à ce que,

pour un même degré de sensibilité de la boussole, son fil soit le moins résistant possible.

Une fois qu'au moyen de ces appareils on peut reconnaître que deux résistances sont égales, voici comment on construit les unités de résistance. Nous avons dit que l'unité première choisie par l'administration des lignes télégraphiques, était la résistance d'un fil de fer de 4 millimètres de diamètre et d'un kilomètre de longueur; comme il est évident qu'une telle unité n'est pas maniable, on lui substitue du fil de laiton fin entouré de coton et enroulé autour d'une bobine en bois; on construit des bobines qui ont une résistance de 1 kilomètre, 2 kilomètres, 100 kilomètres, 1,000 kilomètres. Pour les construire avec exactitude, il faut se servir d'une ligne à 2 fils de fer de 4 millimètres de diamètre et de 500 kilomètres de longueur au moins, en coupant les deux fils de manière à les isoler du reste de la ligne. On les réunit entre eux à 500 kilomètres; le circuit dont on a les deux bouts à sa disposition a donc 1,000 kilomètres d'étendue. On prend alors une quantité de fil de laiton, que l'on diminue en longueur jusqu'à ce que sa résistance, comparée par l'un des procédés précédents à celle de la ligne, lui soit égale. C'est ensuite cette bobine résistante de 1,000 kilomètres qui va servir à construire toutes les autres. On prend un second fil à qui, par sa comparaison avec la bobine déjà formée, on donne une résistance aussi de 1,000 kilomètres. On réunit ces deux bobines bout à bout, de manière que le courant se partage entre les deux: la résistance de ce système n'est que de 500 kilomètres, et servira à construire une bobine qui ait cette résistance; au moyen de cinq bobines de 500 kilomètres, en les accouplant par deux, par quatre ou par cinq, on a des résistances de 250, 175, 100 kilomètres, et ainsi de suite. Il est nécessaire, pour l'exactitude du résultat, de partir de la bobine la plus résistante, afin que les

erreurs qui se font inévitablement par l'imperfection des instruments se trouvent divisées au lieu de s'ajouter.

Une fois ces bobines de résistances obtenues, voici comment on procède pour évaluer une résistance quelconque : On forme un circuit composé d'une pile, d'une boussole et de la résistance à évaluer; on augmente ou on diminue le nombre des éléments de la pile de manière que la boussole marque un nombre de degrés convenable et on note ce nombre de degrés; puis à cette résistance on substitue des bobines, une de 100 et une de 150 kilomètres ou d'autres, de manière que la boussole ne marque pas des nombres de degrés trop différents les uns des autres. Ces circuits se composent :

1° De la résistance de la pile, plus celle de la boussole ;

2° De la résistance cherchée ou celle des bobines.

Il y a ainsi deux inconnues : la résistance de la pile et de la boussole y ; celle cherchée x , et deux connues, les résistances a et b des deux bobines. Soient m , n , p , les nombres de degrés obtenus par ces trois expériences, on aura, les courants étant en raison inverse des résistances à vaincre,

$$\frac{1}{x+y} : \frac{1}{x+a} : \frac{1}{x+b} :: m : n : p,$$

$$\text{Ou } x+y : x+a : x+b :: \frac{1}{m} : \frac{1}{n} : \frac{1}{p}.$$

La première proportion donne :

$$y - a : \frac{1}{m} - \frac{1}{n} :: x + a : \frac{1}{m},$$

$$\text{d'où } y = a + \frac{(n-m)(x+a)}{n},$$

et la deuxième proportion donne :

$$a - b : \frac{1}{n} - \frac{1}{p} :: (x + a) : \frac{1}{n},$$

$$\text{d'où } x + a = \frac{(a - b) p}{p - x},$$

$$\text{d'où } y = a + \frac{n - m}{p - x} \times \frac{p}{n}.$$

Dans la pratique on peut ordinairement négliger la résistance de la pile et celle de la boussole ; on peut même, pour les expériences à faire dans les recherches de dérangement, s'arranger pour qu'il en soit toujours ainsi. Si, par exemple, la résistance à évaluer était faible, on accouplerait les éléments en surface comme nous verrons qu'on le fait pour les piles locales ; dans ce cas, une simple proportion suffit pour évaluer les résistances. Soit y la résistance cherchée qui, intercalée seule dans le circuit, donne un nombre de degrés m . La bobine de résistance a donnant un nombre n de degrés, on aura, en négligeant les résistances de la boussole et de la pile :

$$y : a :: \frac{1}{m} : \frac{1}{n}, \text{ d'où } y = \frac{an}{m}.$$

Si la boussole était trop sensible pour ces faibles résistances, il faudrait diminuer sa sensibilité en établissant un fil de dérivation convenable entre les deux boutons de la boussole, une partie seulement du courant passerait alors par la boussole.

Si l'on n'a pas de bobines de résistance pour servir de comparaison, on peut se servir du nombre de degrés que donne habituellement une longueur donnée de ligne intercalée dans le circuit, mais alors on n'aura que des nombres peu approchés, car la pile ne peut avoir beaucoup varié.

Cette variation de la pile est, en effet, une cause qui peut empêcher, dans certains cas où l'on veut avoir une grande approximation, de se servir de la méthode précédente ; nous indiquerons plus loin comment, au moyen du galvanomètre différentiel ou du parallélogramme de Wheatstone, on peut éliminer cette cause d'erreur. Il nous reste à indiquer comment on peut, par la méthode précédente, évaluer la résistance d'une pile et celle d'une boussole. La résistance de la boussole s'évalue d'une manière très-simple : on relie les deux boutons de la boussole par un fil de dérivation dont la résistance ne soit pas trop considérable, par rapport à celle qui est cherchée, ce qui se fait par tâtonnement : on intercale la boussole ainsi modifiée dans un circuit de grande résistance et dans lequel on fait passer un courant suffisamment fort ; on note le nombre i de degrés donnés par la boussole, puis on lui enlève la dérivation qui y avait été introduite ; on obtient ainsi une nouvelle déviation I plus forte que la première. Comme nous supposons que le circuit a une très-grande résistance par rapport à la boussole, il en résultera que l'on pourra considérer comme nulle la modification qu'apporte à la résistance totale la variation produite par l'enlèvement ou l'établissement de la dérivation. Si, pendant l'expérience, la pile n'a pas varié d'intensité, le courant qui traverse le circuit n'aura pas varié et sera par conséquent constamment représenté par I , et i étant le courant qui passe dans la boussole, $I - i$ sera celui qui passe dans le fil dérivateur ; or ces courants sont, comme on l'a vu, en raison inverse des résistances qu'ils surmontent ; on aura donc la proportion

$$I - i : i :: x : r$$

x étant la résistance cherchée du fil de la boussole et r la résistance connue du fil dérivateur, de là résulte

$$x = \frac{(I-i) r}{i},$$

ce qui revient à dire que la résistance de la boussole s'obtient en multipliant la résistance du fil déivateur par le rapport de la différence des deux déviations à celle obtenue dans le second cas, c'est-à-dire une fois la dérivation établie. Le mode d'expérimentation sera toujours facile quand on aura à sa disposition une collection complète de bobines de résistance. Il est clair que, si l'on a plusieurs boussoles ou galvanomètres à sa disposition, l'évaluation de la résistance du fil de chacun d'eux se fera comme celle des fils ordinaires; le mode précédent suppose que l'on n'a à sa disposition qu'un seul instrument de mesure du courant.

La résistance de la boussole une fois connue, rien de plus simple que de déterminer la résistance des piles. En formant le circuit avec la pile, la boussole, et successivement deux résistances convenablement choisies, r' et r'' , on obtiendra deux déviations de la boussole i' et i'' ; alors, si r est la résistance du fil de la boussole et x la résistance cherchée de la pile, on aura pour résistance des deux circuits :

$$\begin{aligned} 1^{\circ} \quad & x + r + r' \\ 2^{\circ} \quad & x + r + r'' \end{aligned}$$

Or, les courants fournis par une même pile supposée constante étant en raison inverse des résistances à vaincre, on aura la proportion

$$\begin{aligned} i' : i'' &:: x + r + r'' : x + r + r' \\ \text{d'où} \quad i' - i'' &: r'' - r' :: i' : x + r + r'' \\ \text{d'où} \quad x &= \frac{i' (r'' - r')}{i' - i''} - (r + r'') \end{aligned}$$

ce qui donne la résistance cherchée.

On peut encore déterminer la résistance des piles sans connaître préalablement la résistance de la boussole; il suffit pour cela de rendre la résistance de cette dernière tellement faible qu'on puisse

la considérer comme nulle, sans pour cela dépasser le nombre convenable de degrés de déviation. C'est ce qu'on peut faire très-simplement. En effet, la boussole renverserait par le passage du courant d'une pile de dix éléments, par exemple; en prenant un fil de dérivation qui joigne les deux bornes-serre-fils de l'appareil, comme on l'a déjà indiqué plusieurs fois précédemment, si le fil est assez gros, on dérive du fil de la boussole une portion assez forte du courant pour qu'elle ne marque plus qu'un nombre de degrés assez faible, trente, par exemple. En même temps la résistance de la portion du circuit, comprise entre les deux bornes-serre-fils, qui est égale au produit divisé par la somme des résistances du fil de la boussole et du fil de dérivation, devient suffisamment petite pour qu'elle puisse être considérée comme nulle. Ayant ainsi disposé la boussole, si on la réunit par des conducteurs assez gros et assez courts aux deux pôles de la pile, on aura une déviation qui sera proportionnelle à l'intensité I du courant de la pile seule

$$I = \frac{n \cdot e}{n \cdot r}$$

n étant le nombre des éléments, e la force électrique motrice d'un élément, r sa résistance. On ajoute ensuite au circuit une résistance de deux ou trois kilomètres, plus ou moins, de manière à obtenir une nouvelle déviation notablement différente de la précédente, qui en soit, par exemple, la moitié ou les $2/3$; cette nouvelle déviation est proportionnelle à l'intensité I' du nouveau courant qui est donnée par la formule

$$I' = \frac{n \cdot e}{n \cdot r + R}$$

les mêmes lettres représentant les mêmes quantités que précédemment, et R étant la résistance extérieure à la pile. Si D et D' sont les déviations obtenues précédemment, on aura

$$\sin. D : \sin. D' :: I : I'$$

ou, si les déviations sont suffisamment faibles, on pourra poser

pour $D : D' :: I : I'$

$$\text{et par suite } D : D' :: \frac{n \ e}{n \ r} : \frac{n \ e}{n \ r + R}$$

$$\text{d'où } D : D' :: n \ r + R : n \ r$$

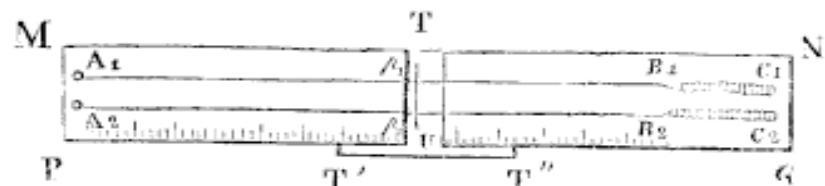
$$\text{et } D - D' : R :: D' : n \ r$$

$$\text{d'où } n \ r = \frac{R \ D'}{D - D'}$$

ce qui revient à dire que la résistance de la pile est égale au produit de la résistance ajoutée dans la deuxième expérience, par la déviation qu'on y a obtenue, et divisée par la différence des déviations obtenues dans la première et dans la seconde expérience. On obtient la résistance moyenne d'un élément en divisant par le nombre des éléments la résistance obtenue pour la pile entière.

Il existe un instrument de construction très-simple, analogue à l'appareil inventé par Wheatstone, et connu sous le nom de rhéostat, qui permet de mesurer toutes ces résistances avec une grande facilité. Cet appareil, employé par M. Pouillet pour mesurer la conductibilité des divers métaux, peut, quand on n'a pas besoin d'une exactitude trop grande, être modifié de manière à pouvoir être construit partout et sans dépense, tout en conservant une exactitude suffisante.

FIGURE 6.



On prend une planche un peu longue, M, N, P, Q, dont le rebord P, Q est bien dressé; sur cette planche on fixe deux fils

très-fins en platine, $A_1 B_1$, $A_2 B_2$; ces fils, attachés en A_1 et A_2 à des bornes-serre-fils, sont parallèles entre eux et tendus par deux ressorts à boudin $B_1 C_1$, $B_2 C_2$. Un petit T en bois, analogue à ceux dont on se sert en dessin ou une équerre en fer, comme celles employées dans l'industrie, est mobile le long du bord $P Q$ et sert à faire mouvoir parallèlement à elle-même la jambe $T U$ de cet instrument. Contre le bord de cette jambe, on fixe un fort fil de platine $p_1 p_2$ qui fait saillie au-dessus d'elle; on glisse alors le T au-dessous des fils $A_1 B_1$, $A_2 B_2$ qui, à cause de leur tension, s'appuieront tous les deux sur le gros fil $p_1 p_2$, quelle que soit la position du T qui sert de curseur. On voit qu'on peut ainsi former le conducteur électrique compris entre les deux bornes A_1 et A_2 , de deux portions des fils fins d'autant plus grandes que le T sera plus éloigné de ces serre-fils, et qu'on peut, par conséquent, faire varier à volonté la résistance de cette portion du circuit. Des divisions métriques tracées sur le bord $P Q$ de la planche permettent d'apprécier la distance du T aux bornes A_1 et A_2 , et par suite la longueur et la résistance de la portion du circuit comprise entre ces points.

Cet instrument combiné soit avec le paralléogramme de Wheatstone que nous avons décrit, soit avec une boussole différentielle, va nous servir à mesurer les résistances que nous avons mesurées précédemment par d'autres procédés. On commence par étalonner son rhéostat, c'est-à-dire par déterminer quelle longueur de son fil a pour résistance celle de l'unité adoptée pour cette quantité, c'est-à-dire de 1 kilomètre du fil de fer de 4 millimètres de diamètre. Pour cette opération, on relie deux bornes d'un côté du paralléogramme de Wheatstone M et N (voir *fig. 5*) avec les deux bornes A_1 et A_2 du rhéostat, ce qui revient à intercaler le fil du rhéostat dans la partie M N du paralléogramme; on intercale de même entre les deux bornes

P et Q une bobine d'un certain nombre de kilomètres de résistance, et on allonge ou on raccourcit la portion active des fils du rhéostat jusqu'à ce que ces deux résistances soient égales, ce qui aura lieu quand le galvanomètre marquera zéro. La longueur des fils du rhéostat parcourue par le courant étant divisée par le nombre de kilomètres de résistance de la bobine, donnera la longueur correspondante à 1 kilomètre. Une simple division par ce quotient suffira ensuite pour déterminer en kilomètres du fil de fer de 4 millimètres, les résistances correspondantes aux diverses longueurs du rhéostat.

La même manière d'opérer, mais en substituant à la bobine la résistance que l'on cherche, permet de déterminer cette dernière, puisqu'elle se trouve égale à celle connue de la longueur du fil du rhéostat qui a ramené à zéro le galvanomètre central du parallélogramme. Dans ce cas, si la résistance cherchée était plus grande que celle de toute la longueur du fil du rhéostat, il faudrait intercaler, dans le circuit du côté de ce dernier, un nombre suffisant de bobines de résistance, pour que la différence de leur résistance totale avec celle cherchée, fût moindre que celle de tout le fil de l'instrument.

Il est clair que dans ces deux mesures, étalonage du rhéostat et mesure de la résistance d'un fil, on peut au parallélogramme substituer une boussole différentielle.

Pour mesurer la résistance de la boussole, au lieu de dériver une portion du courant qui traverse le fil de l'instrument par un fil de longueur invariable qui relie les deux boutons d'entrée et de sortie de la boussole, on opère cette dérivation au moyen du rhéostat, et on la fait varier jusqu'à ce que le courant qui reste dans le fil de la boussole soit juste moitié de ce qu'il était quand il n'y avait pas de dérivation. Alors, si, comme dans la méthode qui a précédemment servi à déterminer la

résistance de la boussole, on a eu soin que la résistance extérieure à la boussole fût considérable par rapport à celle de l'instrument, la résistance donnée par le rhéostat sera égale à celle que l'on cherche. En effet, à cause de la grandeur des résistances extérieures, les variations des résistances comprises entre les deux boutons de la boussole n'auront pas d'influence sur la grandeur du courant fourni par la pile, et par conséquent la boussole n'étant traversée que par moitié de ce courant, il faut que l'autre moitié passe par la dérivation, c'est-à-dire par le fil du rhéostat; ce qui ne peut avoir lieu qu'autant que les fils des deux instruments opposeront au courant la même résistance.

Enfin pour mesurer la résistance de la pile, on compose un circuit formé de la pile, de la boussole et d'une résistance convenable pour que cette dernière ne marque pas plus de 20 ou 30 degrés; on ajoute alors au circuit le rhéostat augmenté, s'il est nécessaire, des bobines de résistance, et on fait varier la résistance de l'instrument jusqu'à ce que le courant ne soit plus que moitié de ce qu'il était précédemment, c'est-à-dire jusqu'à ce que la boussole ne marque plus que moitié de l'intensité précédente. La résistance du circuit se trouve alors doublée, et si nous appelons X la résistance de la pile, B celle de la boussole, A celle des premières bobines ajoutées, R celle du rhéostat et enfin C la résistance des bobines ajoutées avec le rhéostat, on aura :

$$x + A + B = R + c$$

d'où $x = R + c - (B + A)$

c'est-à-dire la résistance du rhéostat augmentée de celle des bobines qui l'ont accompagné, moins la résistance de la boussole augmentée de celle des bobines ajoutées en même temps qu'elle.

On peut aussi, comme nous l'avons vu, diminuer par une dérivation la sensibilité de la boussole ; alors, le plus souvent, la résistance de la boussole et de la dérivation pourra être négligée en présence des autres résistances et en opérant comme dans le cas précédent ; mais sans les bobines, on aura :

$$x = R$$

c'est-à-dire que la résistance de la pile est égale à la résistance du rhéostat, quand cet instrument a réduit à moitié le courant précédemment fourni par la pile. De la résistance de la pile totale on déduit la résistance moyenne de la pile, en divisant par le nombre des éléments la résistance que nous venons de trouver pour la pile entière.

Nous n'avons pas à parler de la distribution du courant dans les conducteurs dont les dimensions sont comparables entre elles, tels que dans les solides autres que les fils et les surfaces ; elles n'auraient pour ce cours aucune conséquence pratique.

Toutefois nous ferons remarquer que, pour un corps comme la terre, qui n'est pas homogène, le courant suit en plus grande abondance les parties les plus conductrices pour se disperser dans la masse totale du corps, et que la résistance peut varier beaucoup selon que le point où le conducteur métallique plonge dans la terre est lui-même plus ou moins bon conducteur. Les parties solides du globe sont souvent tout à fait isolantes ou tout au moins, à peu d'exceptions près, beaucoup moins conductrices que les parties liquides ; on devra donc faire plonger les fils dans une portion humide du sol et en communication facile avec une grande masse d'eau. Dans le cas où le sol serait par lui-même peu conducteur, on devrait augmenter la surface du contact du métal avec la terre ; car comme le courant rayonne autour du

point où le métal plonge, la plus grande résistance est offerte par les parties voisines du métal et on la diminue en augmentant sa section.

Les lois qui relient les dimensions des conducteurs et leurs résistances au courant, ainsi que l'influence de cette résistance sur le courant lui-même étant connues, c'est ici le lieu de résoudre la question suivante : Quelle dimension faut-il donner au fil d'un galvanomètre dont la couche de fil conducteur aurait une forme et des dimensions déterminées pour que l'action d'un courant sur l'aiguille aimantée fût la plus forte possible ? Nous ne tiendrons pas compte de l'épaisseur de la couche isolante qui enveloppe le fil, ou, si l'on veut, nous la supposerons proportionnelle au diamètre du fil. Quand on diminue la grosseur du fil, sa longueur, le nombre de ses tours et par suite l'action du courant sur l'aiguille augmentent en proportion de la diminution de la section, c'est-à-dire que ces quantités seront proportionnelles à $\frac{1}{s}$, s étant la section. La résistance r du fil au courant sera, d'une part, proportionnelle à l et, par suite, à $\frac{1}{s}$, et, d'autre part, en raison inverse de la section ou proportionnelle à $\frac{1}{s}$; elle sera donc en tout proportionnelle à $\frac{1}{s^2}$, d'où résulte que l'action qu'exerce le courant sur l'aiguille et qui est proportionnelle à $\frac{1}{s}$ le sera également à la racine carrée de r ou \sqrt{r} . Si nous appelons R les résistances autres que le fil de la bobine qui sont comprises dans le circuit, la résistance que le courant aura à vaincre sera $R + r$, et alors le courant aura une intensité en raison inverse de $R + r$, ou proportionnelle à $\frac{1}{R + r}$; d'où résultera pour la déviation de l'aiguille une force proportionnelle à

$$\frac{\sqrt{\frac{r}{R}}}{R+r} = \frac{\sqrt{\frac{r}{R}}}{1+\frac{r}{R}} \times \frac{1}{\sqrt{\frac{r}{R}}}$$

d'où posant $x = \sqrt{\frac{r}{R}}$, on aura

$$\frac{1}{\sqrt{R}} \times \frac{x}{1+x^2} = \frac{1}{\sqrt{R}} \times \frac{1}{\frac{1}{x}+x}$$

Pour que l'action du courant sur l'aiguille soit la plus grande possible, il faut donc que cette dernière quantité soit elle-même la plus grande possible, ce qui aura lieu, R étant constant, quand $\frac{1}{x} + x$ sera le plus petit possible ; ce qui exige que x soit égale à l'unité. En effet posons :

$$x = 1 + y$$

$$\text{On aura : } \frac{1}{x} + x = \frac{1}{1+y} + 1 + y,$$

En réduisant au même dénominateur, on aura :

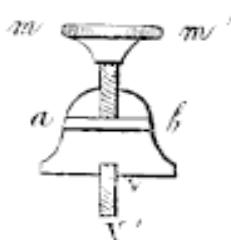
$$2 + \frac{y^2}{1+y},$$

quantité qui sera évidemment minimum quand y sera nul, puisque pour toute valeur positive ou négative de y plus petite que 1, $\frac{y^2}{1+y}$ est positif. Or l'équation $y=0$, donne $x=1$ et $\sqrt{\frac{r}{R}}=1$, d'où $r=R$.

C'est-à-dire que, dans une boussole donnée, pour que la bobine fasse produire au courant son maximum d'effet sur l'aiguille aimantée, il faut et il suffit que le fil qui compose la bobine ait une section telle, que la résistance de ce fil soit égale à la somme des résistances extérieures à la boussole que le courant doit vaincre, en admettant toutefois que les dimensions de l'enveloppe isolante restent constamment proportionnelles à celles du fil.

Les lignes télégraphiques et les conducteurs dans les postes sont composées de parties qui doivent être reliées entre elles ; le mode de liaison varie avec la permanence plus ou moins grande de ces liaisons. Si elles doivent être invariables, on les établit soit au moyen de la soudure des deux parties, soit par rivure, soit par simple torsion des deux parties entre elles. Si les liaisons étant habituellement stables doivent être enlevées assez fréquemment, elles se font par pression des deux pièces l'une contre l'autre ; pression qui est maintenue soit par la tension comme dans les appareils de ligne appelés tendeurs, soit au moyen de vis. Quand on veut relier un fil à une masse métallique ou à une pièce fixe, on visse sur cette pièce un petit appareil appelé borne-serre-fil ou simplement borne ; il a souvent la forme indiquée dans la figure ci-dessous, qui la représente en coupe.

FIGURE 7.



Le corps se compose d'une pièce métallique ayant la forme d'une borne ; il est percé de part en part et perpendiculairement à l'axe d'un trou *a b* par lequel on passe le fil que l'on veut attacher ; la borne est fixée à l'autre pièce au moyen d'une vis *v v'* dirigée suivant son axe et soudée ou vissée au pied de la borne ; enfin une vis à tête fraisée entre dans un trou taraudé, percé suivant l'axe de la borne jusqu'au trou *a b*. Cette vis presse contre le fil que l'on place en *a b* et assure sa communication métallique avec la borne qui, vissée elle-même sur la pièce fixe, fait corps avec elle.

Si la pièce à laquelle on veut relier le fil était une lame fixée sur du bois, on remplacerait la vis à métal v v' de la borne par une vis à bois ; on perceraît la lame d'un trou à travers lequel passerait la vis pour s'enfoncer dans le bois ; la lame se trouverait alors comprimée entre ce corps et le pied de la borne, ce qui établirait la communication métallique avec cette dernière, à laquelle le fil se trouve attaché comme précédemment.

Quand on veut réunir entre eux deux fils mobiles, on se sert de serre-fils.

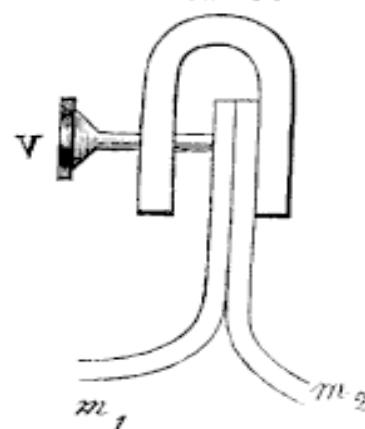
FIGURE 8.



Ce sont de petits cylindres en métal percés suivant leur axe : d'un trou dans lequel on introduit les extrémités f^1 , et f^2 des fils à réunir ; ces fils, au moyen de vis v , v' au nombre de deux ou plus, sont comprimés contre le métal et communiquent métalliquement avec lui et par suite entre eux.

La réunion de deux lames mobiles se fait au moyen d'une pièce métallique de forme rectangle échancreée en v . La figure ci-dessous donne la forme de ces pièces, qui portent le nom de serre-lame :

FIGURE 9.



Les deux lames entrent dans l'échancrure et sont pressées l'une contre l'autre et contre une des parois du serre-lame, au moyen d'une vis qui traverse l'autre paroi au moyen d'un trou taraudé.

Si les deux lames devaient être fixes, il suffirait pour les relier d'une manière convenable de les percer chacune d'un trou, et à travers les deux on ferait passer une vis qui , entrant dans le bois, presserait les deux lames l'une contre l'autre. Enfin , si l'on veut réunir une lame avec un fil, tous les deux mobiles, on prend un cylindre dont une moitié est disposée comme le serre-fil, et dont l'autre est fendue suivant son axe, et munie d'une vis comme le serre-lame : c'est en définitive à la fois un serre-fil par un côté et un serre-lame par l'autre ; on lui donne le nom de serre-fil et lame.

Quand les fils que l'on doit attacher avec des serre-fils de quelque nature que ce soit sont trop fins, on les soude à un bout de fil plus gros que l'on introduit dans le trou du serre-fil. Si l'on n'avait pas de serre-fil à sa disposition, on pourrait faire souder les fils à de minces lames de cuivre percées de trous, et en fixant ces lames à une pièce de bois au moyen d'une vis, on retomberait dans le cas de la réunion de deux lames.

Enfin, lorsque les lames doivent être réunies et séparées fréquemment ou en très-peu de temps, ces appareils ne peuvent plus être employés. On réunit métalliquement les pièces au moyen d'un ressort qui vient presser contre une pièce métallique fixe. Comme ces derniers appareils changent de forme suivant leur destination, nous les décrirons plus loin.

Ces divers modes de réunion des pièces métalliques entre elles n'ont pas la même valeur. On remarque , en effet, que lorsque la force avec laquelle une pièce vient à appuyer contre l'autre

est très-faible, le courant éprouve en ce point une résistance qui devient d'autant plus considérable que la pression est moins forte, et qui passe d'une manière continue d'une valeur inappréciable, quand la pression est suffisamment forte, à l'infini, quand la première devenant nulle, les deux pièces commencent à se séparer, pourvu que le courant ne soit pas engendré par une force électro-motrice suffisante pour vaincre la résistance de l'air. Cette raison doit faire préférer d'abord la réunion par soudure, rivure ou torsion, puis par pression au moyen d'une vis, et enfin au moyen d'un ressort quand on ne peut pas faire autrement. La réunion par la pression simple ou par la torsion, et surtout la première, présente le grave inconvénient de laisser l'air et la poussière pénétrer entre les pièces. Le premier de ces corps oxyde les surfaces, et comme les oxydes ne sont pas conducteurs, au moins pour une certaine épaisseur, il en résulte une grande augmentation de résistance, qui peut même arriver jusqu'à intercepter totalement le courant. Un grand inconvénient que présente la réunion par la pression des vis, c'est qu'il arrive quelquefois que les vis se desserrent d'elles-mêmes. Ce grave inconvénient s'est présenté plusieurs fois, notamment sur la ligne du Nord, où le passage du courant s'est trouvé fréquemment intercepté parce que les vis s'étaient desserrées. Il faut donc, autant que possible, recourir à la soudure, au moins à la rivure ou à la torsion des fils entre eux; et dans les postes où beaucoup de communications se font au moyen de la pression des vis, le plus grand soin doit être apporté à l'examen de leur état, afin de les resserrer quand elles commencent à se dévisser; il faut aussi maintenir toujours décapées les parties en contact.

Quant aux communications qui doivent être sans cesse échangées et qu'on établit au moyen de ressorts, leur disposition varie selon le but que l'on veut remplir; ainsi, si les contacts doivent

être prolongés, le ressort se met en contact avec la pièce fixe par frottement, ce qui empêche les corps étrangers de s'interposer entre les pièces métalliques. Mais comme ordinairement le ressort se met en contact avec diverses pièces métalliques, fixées sur le bois comme substance isolante, si ces pièces ne font qu'affleurer le bois, le ressort doit frotter à la fois sur le bois et sur le métal, et comme d'ailleurs ce frottement use les deux métaux, il en résulte que le ressort entraîne des poussières métalliques qui viennent s'étaler sur le bois dans l'intervalle des parties conductrices, ce qui finit par établir entre elles des communications qui présentent les plus graves inconvénients. On a paré à ces fâcheux effets du frottement en faisant ressortir au-dessus du bois les pièces métalliques qui y sont incrustées, et en leur donnant une forme arrondie sur les bords, ce qu'on désigne sous le nom de forme de goutte, parce que c'est à peu près la forme qu'affecte un liquide en s'étalant en petite quantité sur les corps. Lorsque les contacts doivent être de très-courte durée et fréquemment répétés, la disposition par frottement qui avive sans cesse les parties en contact ne peut plus être employée à cause de l'usure rapide des parties frottantes. La communication dans ce cas doit avoir lieu par pression seulement, ou au moins avec un frottement très-léger, il faut alors avoir soin de maintenir bien propres les parties en contact ; malgré cela, un autre inconvénient qui provient de la fréquence des interruptions du courant, oblige à avoir des contacts particuliers. Quand un courant un peu fort ou traversant un conducteur plié en hélice est interrompu par la séparation des deux parties du conducteur qui sont en contact, on remarque entre elles une étincelle, juste au moment de leur séparation. Cette étincelle est due au transport de particules métalliques par le courant qui se maintient à travers l'air après la rupture du circuit ; si le métal est oxydable, ces poussières s'oxydent et on a un dépôt de substance non conduc-

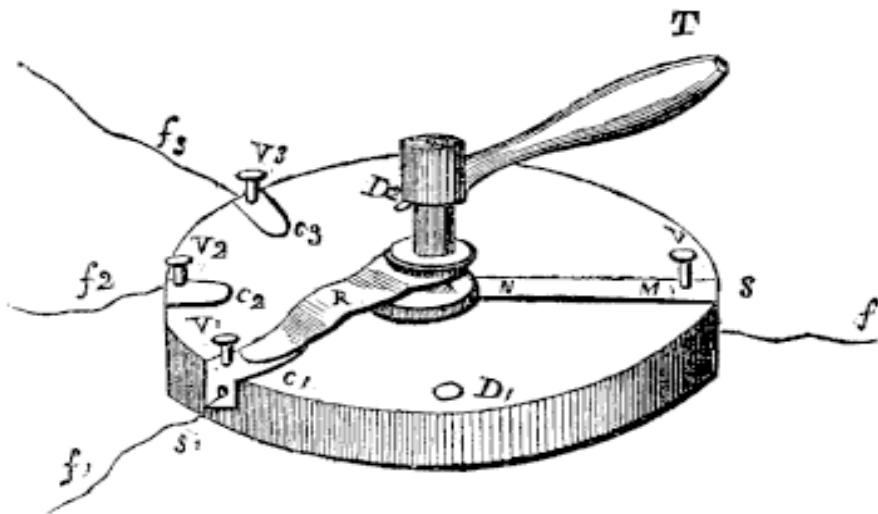
trice sur les électrodes, dépôt que le frottement n'enlève pas, puisque le contact a lieu par pression. Cet effet d'oxydation des électrodes séparés fréquemment dans l'air se fait encore sentir, bien que l'étincelle cesse d'être visible. Afin d'empêcher cette oxydation, les contacts doivent se faire au moyen de corps conducteurs peu oxydables, tels que le platine et le charbon. Nous ne parlerons pas des autres procédés que l'on a employés, parce que ces moyens sont trop délicats pour être utilisés pratiquement. Toutefois, je dois faire observer que l'emploi du platine n'est pas un moyen absolu de résoudre cette difficulté, car sur les électrodes des interrupteurs qui ont subi des étincelles un peu fortes, on remarque une poudre noire qui est bien du platine, mais qui dans cet état est fort peu conducteur de l'électricité, au moins pour celle qui a une faible tension, et il faut avoir soin d'enlever cette poudre, pour diminuer la résistance du conducteur ou même pour que le courant puisse passer.

Nous allons maintenant décrire les divers appareils employés dans les postes télégraphiques pour modifier la marche du courant. On les désigne sous le nom de : interrupteur, commutateur, permutateur et inverseur. Nous allons indiquer successivement les formes adoptées pour chacun d'eux.

L'interrupteur ayant uniquement pour but d'arrêter la transmission du courant, il suffit qu'il interrompe la communication métallique en un point quelconque du circuit. Comme la plupart de ces appareils, il se compose d'un socle circulaire en bois rond dans lequel sont percés deux trous D_1 D_2 destinés à fixer l'appareil au moyen de vis à bois. Un axe placé au centre du plateau est susceptible de tourner sur lui-même, au moyen d'une tige T ; à cet axe se trouve fixé un ressort en cuivre ou en acier, dont l'extrémité touche presque le pourtour du plateau en bois,

en un point duquel est incrustée une petite pièce métallique C_1 dépassant la surface du plateau et ayant à sa partie supérieure

FIGURE 10.



la forme de goutte comme nous l'avons indiqué plus haut. Cette pièce est percée sur le côté du plateau d'un trou S_1 , dans lequel s'engage le bout d'une des parties du conducteur qui y est maintenue au moyen d'une vis V_1 ; c'est une espèce de serre-fil. D'un autre côté, l'axe du ressort communique au moyen d'une lame de cuivre $N M$ avec un petit serre-fil S , construit comme le précédent, et dans lequel vient s'engager le bout de l'autre partie du conducteur. Il résulte de cette disposition que lorsque le ressort est mis sur le contact C_1 il y aura communication métallique entre les bouts des deux parties du conducteur. Si au contraire le ressort ne touche pas le contact, il y aura interruption du conducteur.

En établissant plusieurs contacts C_1 C_2 C_3 , on pourra établir successivement la communication métallique du fil attaché au S , c'est-à-dire l'axe avec plusieurs fils fixés dans les serre-fils f_1 f_2 f_3 . — Si le fil qui vient en S est fixé par son autre bout au pôle d'une pile, on changera la direction du courant, qui, à vo-

lonté se portera dans les fils f_1 , f_2 , f_3 ; l'appareil porte alors le nom de commutateur.

Si l'on a plusieurs fils F_1 F_2 F_3 , — que l'on veuille relier deux à deux d'une manière quelconque, on se servira d'un permuteur. Cet appareil se compose de deux planchettes de bois carrées, dans lesquels on a incrusté des lames de métal parallèles entre elles et, pour la régularité, à égale distance les unes des autres. Ces lames sont terminées par de petits serre-fils semblables à ceux des commutateurs et auxquels on vient attacher les fils F_1 F_2 F_3 , pour le premier plateau, et F_1 F_2 F_3 pour le second. Ces deux plateaux sont fixés l'un à l'autre par la partie qui n'est pas garnie de lames métalliques, et de manière que les lames d'un plateau soient dans une direction perpendiculaire à celles de l'autre plateau. Aux points qui correspondent aux croisements des lames, on a percé de petits trous qui traversent de part en part la double planche. Dans ces trous on introduit des chevilles métalliques qui établissent la communication métallique entre les deux lames qui se croisent en ce point. On peut donc ainsi unir métalliquement deux quelconques des fils qui sont en communication avec ces lames.

FIGURE 11.

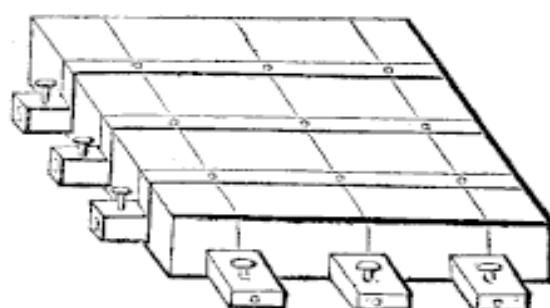


FIGURE 12.

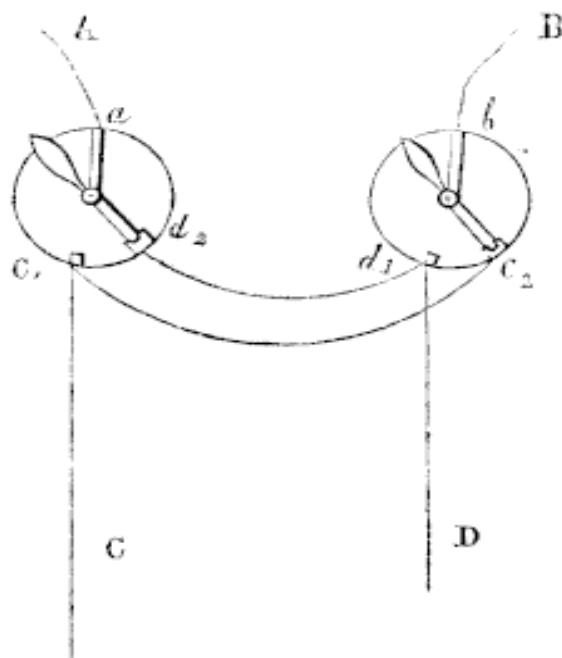


Afin de rendre bonne la communication métallique de ces lames, les chevilles sont de forme conique et on les enfonce à refus dans les trous des lames supérieures A. Ces chevilles sont

fendues dans le sens de leur longueur, de manière que le bout puisse s'amincir par le rapprochement des deux côtés de la fente, et à cause de l'élasticité elles peuvent s'enfoncer plus ou moins dans les trous des lames inférieures, tout en conservant avec elles une bonne communication métallique.

Quand deux fils, A et B, communiquent avec deux autres fils, C et D, dans l'ordre suivant : A avec C, B avec D, il peut être utile d'intervertir cet ordre, que A communique avec D et B avec C. Cette opération peut facilement se faire au moyen de deux commutateurs à huit boutons.

FIGURE 13.

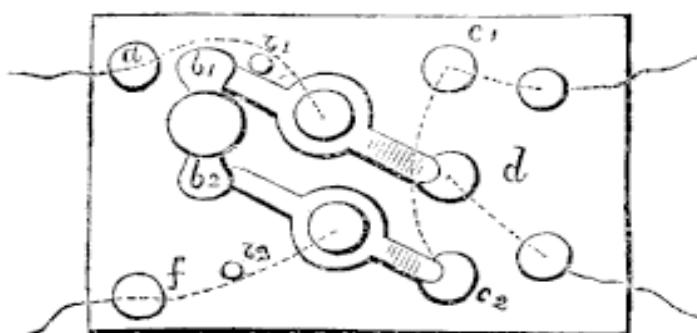


Les boutons qui communiquent avec les axes reçoivent les fils A et B, l'un des fils D se bifurque et entre dans les boutons intérieurs, d_1 d_2 ; l'autre C₁ se bifurque également et entre dans les boutons c_1 c_2 . Si les deux manivelles sont dirigées sur le côté gauche, comme dans la fig. 13, on voit que A sera en relation toute métallique avec D par les boutons a et d_2 , les fils de jonction

et le bouton d_1 ; de même B sera en communication avec C. L'inverse, c'est-à-dire les communications métalliques de A avec C et de B avec D, aurait eu lieu, si les deux manivelles eussent été tournées du côté opposé.

On a eu l'idée de réunir les deux manivelles, qui sont toujours parallèles entre elles, par une bielle de longueur égale à la distance des centres, et d'attacher la poignée à cette bielle. En rapprochant les deux appareils de manière à les confondre, on a pu réunir en un seul les contacts d_2 et d_1 , et l'appareil a pris la forme indiquée dans la figure ci-dessous :

FIGURE 14.

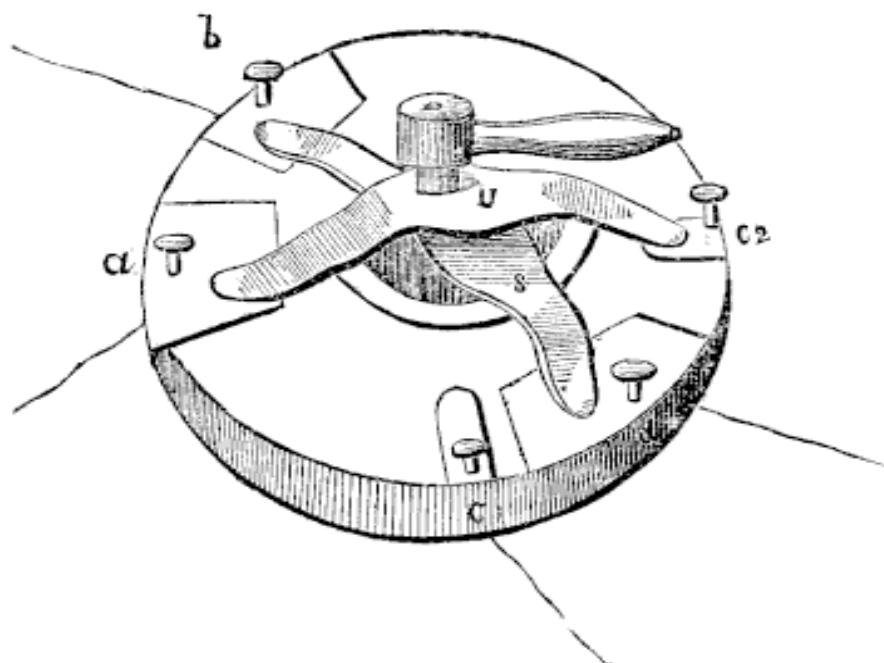


a et f sont les boutons des fils A et B; les trois contacts, c_1 d c_2 , remplacent les quatre contacts précédents, c_1 c_2 d_1 et d_2 , et c_1 c_2 sont en communication avec le fil C, tandis que d est relié au fil D; b_1 b_2 est la bielle qui réunit les deux manivelles, p en est la poignée, et r_1 , r_2 sont deux petits arrêts qui limitent la course des ressorts.

On a établi d'une manière différente la réunion des deux commutateurs en les superposant au lieu de les mettre à côté l'un de l'autre. Les deux axes venant à se confondre, il est clair que ce n'est plus par là que l'on peut faire arriver deux des fils; alors, comme on le voit dans la figure ci-contre, on a prolongé

les ressorts en les croisant et en les isolant l'un de l'autre et de l'axe. On a établi la communication métallique des deux fils A et B par des contacts assez étendus, *a* et *b*, pour que la com-

FIGURE 15.



munication des ressorts avec leurs contacts respectifs subsistent quelle que soit la position de la poignée. Les deux contacts *d*₁ et *d*₂ sont réunis en un seul assez large pour que chacun des ressorts vienne successivement s'appuyer sur lui dans les positions extrêmes de la course. Alors le ressort *U*, dans ses deux positions, met alternativement la lame *b* en contact avec les deux lames *c*₁ et *d*, et le ressort *s*, la lame *a* avec les lames *d* et *c*₂. Le fil *C* est attaché aux contacts *c*₁ et *c*₂, et le fil *D* au contact *d*.

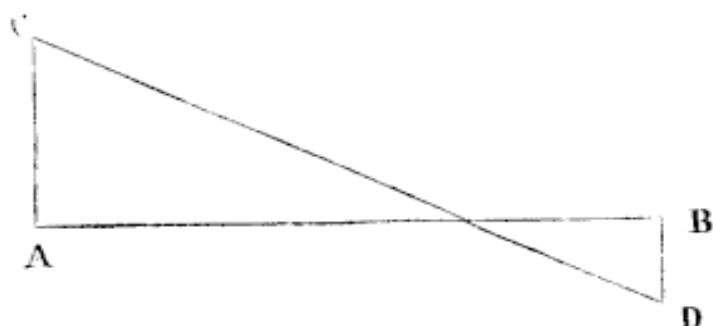
§ 2.

**DE LA PROPAGATION DU COURANT DANS LES CONDUCTEURS;
DE L'INDUCTION.**

Quand une pile n'a pas ses deux pôles reliés par un conducteur, il se développe à chaque pôle une tension que nous avons

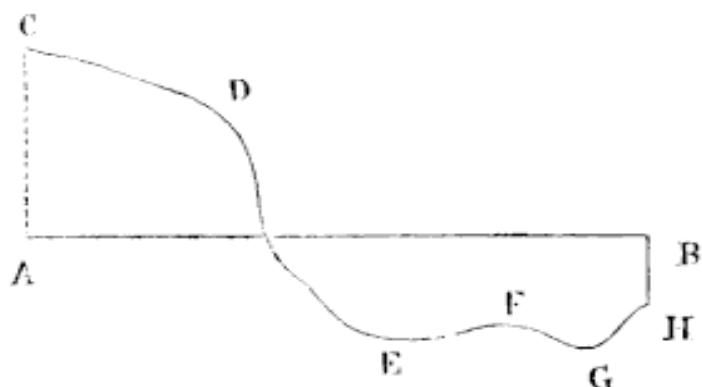
vue (page 19) être proportionnelle à la force électro-motrice de la pile. Cette tension est, pour l'un des pôles, produite par l'électricité positive, et, pour l'autre, par de l'électricité négative ; en mettant ce dernier pôle en communication avec la terre, dont la tension est nulle, la tension à l'autre pôle devient double. En un mot, la tension individuelle de chaque pôle peut varier, mais leur différence, en prenant avec des signes différents les tensions des électricités de nom contraire, est constante et proportionnelle à la force électro-motrice. Lorsqu'on met un conducteur métallique en communication avec l'un des pôles seulement, il prend dans toute sa longueur la même tension que ce pôle ; mais s'il est réuni par un de ses bouts à l'un des pôles et par l'autre à l'autre pôle, il se trouve avoir, à chacune des extrémités, la tension du pôle adjacent, et dans l'intervalle il passe d'une manière continue d'une tension à l'autre. On observe toujours la même différence de tension entre deux points séparés par des portions de conducteurs ayant des longueurs réduites égales, et cette différence est proportionnelle à ces dernières quantités. Il en résulte donc que le rapport de la différence des tensions de deux points à la longueur réduite de la portion qui les sépare, est constante et égale à la différence des tensions des deux pôles de la pile, divisée par la résistance que le courant aura à vaincre, c'est-à-dire à l'intensité du courant. Cette intensité n'est autre chose que la quantité d'électricité qui passe pendant l'unité de temps d'une tranche du conducteur à celle qui suit. On en conclut que dès qu'une différence de tension existe par une cause quelconque entre deux tranches d'un conducteur voisines l'une de l'autre, il s'établit entre les deux un courant qui sera proportionnel à cette différence, de même signe qu'elle et en raison inverse de la longueur réduite de la portion du conducteur qui les sépare. Toutes ces lois se représentent clairement par la figure ci-centre :

FIGURE 16.



A B représente la longueur réduite entre les deux points A et B. A C et B D sont des longueurs qui par leurs dimensions et leurs sens représentent ces tensions en ces deux points. Les hauteurs de chaque point de la ligne C D au-dessus de A B représentent les tensions aux points correspondants du conducteur. Le courant est proportionnel à la tangente de l'angle des deux droites A B, B C. Si, par une cause quelconque, les tensions étaient de chaque point maintenues constantes, mais différentes de l'un à l'autre, alors la figure 17 représenterait toutes les circonstances du phénomène.

FIGURE 17.

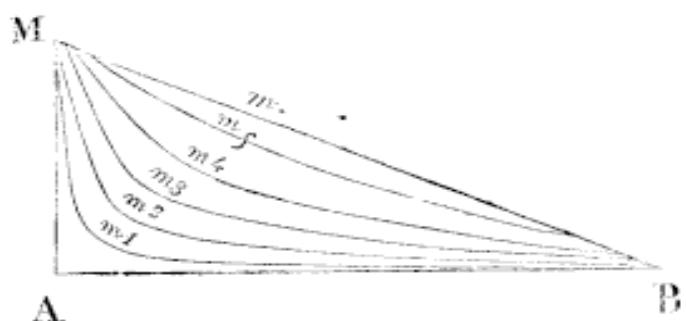


Les ordonnées de la courbe C D E F G H représenteraient les tensions aux divers points qui leur correspondent dans le conducteur, et les tangentes en ces mêmes points feraient avec A B des angles dont les tangentes seraient proportionnelles aux intensités des courants aux points correspondants du conducteur.

On voit que le phénomène est tout à fait analogue à l'écoulement des gaz ou des liquides dans les conduites; les abscisses de ces deux figures ou les distances au point A seraient les longueurs réduites des conduites, c'est-à-dire la somme des épaisseurs des diverses tranches infiniment minces de la conduite, divisées par leurs sections propres. Les ordonnées ou les distances des points de la droite C D, ou de la courbe C D E F G H aux droites A B seraient les tensions du gaz ou les pressions de l'eau dans les diverses tranches de la conduite; enfin, les tangentes à la courbe des tensions ou pressions auraient pour tangentes de leur angle avec A B la quantité d'eau ou de gaz qui traverse chaque tranche dans l'unité de temps, c'est-à-dire le courant d'eau ou de gaz qui les traverse à chaque instant.

Dans les transmissions du courant électrique sur nos lignes, les deux bouts du conducteur sont primitivement à la terre, ce qui réduit à zéro la tension en chaque point. Les longueurs réduites

FIGURE 18.



sont proportionnelles aux longueurs de la ligne elle-même, quand le fil est partout le même; alors A B représentant ce fil, représentera également les longueurs réduites de ses divers points; par suite, quand aucune pile n'est en communication avec ce fil, les tensions sont représentées par cette même droite A B. Au moment même où l'une des extrémités A séparée de la terre est

mise en communication avec le pôle positif de la pile, la tension en ce point A devient égale à la tension de ce pôle, tension qui est proportionnelle à la force électro-motrice de la pile, dont nous supposons les résistances nulles. Quand le courant est une fois établi d'une manière définitive, alors la tension est représentée en chaque point par la droite M B ; au point A, elle est égale à la tension du pôle de la pile ou à sa force électro-motrice, et en B, point de contact avec la terre, elle est nulle. Entre ces deux états extrêmes, la courbe varie d'une manière continue ; le calcul donne parfaitement ces courbes pour chaque instant, en partant de ce principe évident que l'augmentation de la tension en chaque moment et pour chaque tranche est proportionnelle à la différence de la quantité d'électricité reçue de l'une de ses voisines et de celle transmise à l'autre, ou à la somme des courants qui viennent de ces tranches, en ayant soin de différencier le sens des mouvements par la différence positive ou négative du signe qui précède ces quantités. On voit alors que ces courbes auront à peu près les formes M m, B, M m, B qui, partant de la forme M A B, arrivent à la forme M B d'une manière continue. Les tangentes des angles que font les tangents en chaque point des courbes représentent le courant qui a lieu au point correspondant du conducteur et au moment pour lequel la courbe en question représente les tensions. On verra, par l'inspection de la figure, qu'au point M, le courant est d'abord infini, puis va sans cesse en diminuant jusqu'à atteindre l'état final que possède le courant établi d'une manière définitive. Au point B, le courant établi de prime-abord est infiniment petit et augmente graduellement jusqu'à devenir égal au courant définitif.

On voit donc qu'un courant, bien que transmis pour ainsi dire instantanément à l'extrême d'une ligne quelque longue qu'elle soit, n'y acquiert une intensité sensible et utile qu'au bout d'un

certain temps, très-court, il est vrai, pour les lignes placées sur des poteaux, mais qui devient sensible et très-sensible dans les lignes sous-marines ou souterraines. Dans ces lignes, le fil est entouré d'une gaine isolante, enveloppée d'un corps conducteur, fer ou eau de mer ; il se trouve alors dans le cas d'une bouteille de Leyde, et chaque point ne se trouve avoir pour tension que la différence des quantités d'électricité existant dans le conducteur intérieur et à la surface de l'enveloppe isolante. La quantité d'électricité qui se trouve dans l'intérieur du conducteur est, comme dans la bouteille de Leyde, proportionnelle à la tension, c'est-à-dire égale à la tension multipliée par une certaine quantité qui dépendra de l'épaisseur de la couche isolante et qui sera constante quand l'épaisseur de cette substance le sera. Dans ce cas, l'augmentation de tension en chaque point est bien proportionnelle à la différence de la quantité reçue par chaque tranche et de celle qu'elle transmet, mais dans une proportion beaucoup moindre, de sorte qu'il faudra un temps beaucoup plus long pour l'établissement successif des courbes de tension que nous avons indiquées plus haut, et par suite le courant se transmettra bien moins vite à l'extrémité de la ligne avec une intensité suffisante.

Nous venons d'examiner le cas de la propagation du courant. Voici un cas analogue, mais où il ne s'établit pas de courant permanent. Nous avons vu que lorsqu'un fil isolé était mis en communication avec un pôle d'une pile dont l'autre pôle était maintenu à une tension nulle par son contact avec la terre, il se mettait en équilibre de tension avec le pôle auquel il était joint. La courbe qui représente les tensions initiales est donc l'axe des x , AB, fig. 19, excepté pour l'origine, où la tension est celle du pôle de la pile ; la courbe finale est une ligne CD parallèle à l'axe des x , menée à une distance de cette ligne égale à la longueur AC qui représente la tension de la pile.

FIGURE 19.



Quant aux courbes intermédiaires, elles se rapprocheront des formes que présente la figure, c'est-à-dire Cm_1B , Cm_2b_2 , Cm_3b_3 , CD , en passant insensiblement de CAB à CD . Il n'y a jamais de courant en B , et en A le courant commencera par être infini et finira par devenir nul.

Si au lieu de mettre le pôle négatif de la pile à la terre, on l'eût mis en communication avec un fil identique à celui qui a été attaché au pôle positif, ce dernier fil se serait chargé d'électricité négative dont les tensions eussent été représentées par des courbes analogues à celles de la figure précédente ; il en eût été de même du fil attaché au pôle positif, qui se serait chargé d'électricité positive. On voit donc qu'avec deux fils, sans terre et sans circuit fermé, on a dans les fils un courant variable et temporaire, commençant par être infini près des pôles, pour devenir nul ensuite. Enfin, aux extrémités les plus éloignées, il n'y aurait jamais de courant.

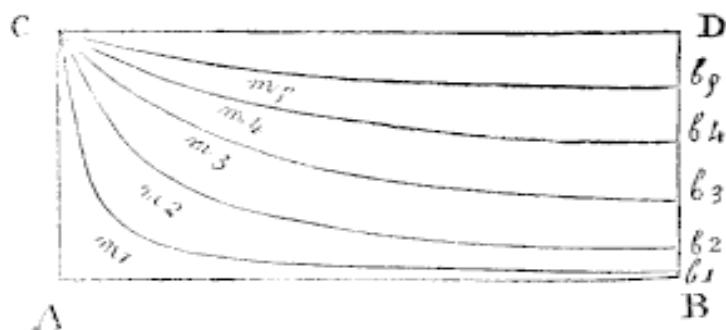
Cette considération de la charge d'un fil isolé peut servir à déterminer approximativement le point de rupture d'un fil qui, malgré cela, reste isolé. En effet, quand on fait passer dans une boussole une série de courants de courte durée, l'aiguille, au lieu d'osciller à chaque interruption de courant, marque une déviation à peu près fixe : elle est la même que celle d'un courant permanent qui dans le même temps décomposerait le sul-

fate de cuivre d'un voltamètre en même quantité que les courants partiels que nous considérons. La déviation du galvanomètre à travers lequel la charge du fil s'opérera un certain nombre de fois par seconde, donnera donc facilement la quantité d'électricité qui a traversé cet instrument pendant ce temps : alors en divisant par le nombre de charges du fil, on a la quantité d'électricité de chacune d'elles. Cette quantité est proportionnelle à la longueur du fil qui a été chargé d'électricité. Si donc on connaît la quantité d'électricité qui charge à une tension donnée une longueur de fil donnée, on en déduira, par une simple proportion, la longueur du fil que l'on charge dans l'opération que nous venons de décrire. Voici comment devrait être conduite l'expérience : Un appareil quelconque ayant un mouvement régulier, établirait, comme le manipulateur actuel, la communication du fil que l'on veut éprouver alternativement et régulièrement avec la pile, par l'intermédiaire de la boussole, pour le charger, et avec la terre, sans intermédiaire pour le décharger ; cette opération devrait avoir été faite préalablement, alors que la ligne était encore en bon état. Soit N le nombre de courants envoyés par seconde dans ce fil et I la déviation qu'indique la boussole. Lorsque le fil est rompu et qu'il ne communique pas avec la terre, on fait la même opération en augmentant le nombre des courants envoyés par seconde, jusqu'à ce que la boussole marque la même déviation I que lorsque le fil était intact ; soit N' ce nombre. En admettant que la pile ait la même force électro-motrice que précédemment, ce qu'on peut admettre approximativement, si le nombre d'éléments est le même, le rapport inverse $\frac{N'}{N}$ indiquera le rapport $\frac{L}{x}$ de la longueur L de la ligne à la distance x à laquelle elle se trouve rompue. En effet, N' et N étant les nombres des charges, sont entre eux en raison inverse des quantités d'électricités qu'elles fournissent, puisque par ces

répétitions elles ne produisent que le même effet sur la boussole.

Lorsqu'un fil est chargé d'électricité distribuée d'une manière quelconque, et que l'on met une de ses extrémités en communication avec la terre, il se décharge par ce bout, et les courbes qui expriment les tensions partant de la forme qui représente l'état initial des tensions, arrivent d'une manière continue à se confondre avec l'axe des abscisses. Il en serait de même si l'on mettait les deux extrémités en communication avec la terre ; seulement les courbes intermédiaires seraient autres que celles du cas précédent et arriveraient beaucoup plus tôt à se confondre avec l'axe des abscisses. Ces deux derniers cas sont ceux où se trouvaient les lignes télégraphiques dans certaines circonstances : le premier, lorsque le fil est rompu et ne touche pas la terre ; le second, lorsque la ligne étant très-longue ou plongée dans un milieu conducteur, on passe trop rapidement de la communication avec la pile à la communication avec la terre. Dans le premier cas, le fil commence par se mettre en équilibre de tension avec le pôle auquel il est joint, et la distribution des tensions est représentée pendant ce temps de la charge du fil par les courbes que nous avons indiquées précédemment ; quand ensuite on met le fil en communication avec la terre, il se décharge graduellement, et la distribution des tensions, représentée d'abord par la parallèle CD à l'axe des abscisses et distante de cette ligne

FIGURE 20.



de la longueur qui représente la tension du pôle distante de cette ligne de la longueur qui finit par être représentée par l'axe des abscisses, en passant d'une manière continue de l'une à l'autre par des courbes $m_1 m_2 m_3$ —représentées dans la figure(20); le courant, qu'on appelle courant de retour, est d'abord infini et devient nul peu à peu. En somme, si la ligne est bien isolée, la quantité d'électricité qui s'écoule par A sera proportionnelle à la charge du fil, à sa section ou à sa longueur, ou, si l'on veut, à la charge et au volume du fil.

On ne peut se servir des décharges répétées du fil comme nous l'avons fait des charges, pour déterminer le point de rupture des fils, à cause des pertes qu'éprouvent les fils chargés d'électricité, pertes variables aux divers points de la ligne, et qui font que la quantité d'électricité fournie par la décharge n'est pas la même que celle fournie par la charge.

Bien qu'une ligne soit par son extrémité en communication avec la terre, il y a un courant de retour qui devient sensible, si les lignes sont suffisamment longues, ou si comme dans les lignes souterraines et sous-marines, une grande quantité d'électricité est condensée dans le fil pour la production du courant.

Diverses circonstances modifiant la marche de l'électricité dans les conducteurs, nous allons les examiner successivement, en insistant d'une manière spéciale sur celles qui ont une influence marquée dans l'application de l'électricité à la télégraphie.

Nous avons déjà parlé de l'influence considérable que possède le milieu dans lequel se trouve plongé le fil, relativement à la propagation du courant. M. Faraday s'est le premier occupé scientifiquement de ce phénomène qui avait, peu de temps auparavant,

été signalé à l'administration télégraphique française par M. Blavier, alors inspecteur sur la ligne du Nord. L'influence de cette cause du retardement de la propagation du courant a été trouvée très-considerable, dans un fil de cuivre enveloppé de gutta-percha, enterré dans le sol et qui avait 768 milles anglais, ou environ 1,236 kilomètres 1/2 de longueur. MM. Faraday et Clark ont observé que le courant n'arrivait à l'extrémité de la ligne que 2/3 de seconde après son envoi, ce qui donnerait une vitesse de 1,000 milles, ou 1,610 kilomètres par seconde, si cette vitesse était la même, quelle que soit la longueur. Cette hypothèse toutefois ne se vérifie pas, la longueur du circuit étant un des éléments qui font varier le temps que le courant met à se propager avec une intensité donnée. La vitesse de propagation du courant que MM. Fizeau et Gounelle avaient trouvée pour le fil de cuivre de la ligne de Rouen, était de 180,000 kilomètres par seconde, c'est-à-dire plus de cent fois plus considérable que celle trouvée par MM. Faraday et Clark.

Nous avons déjà donné l'explication de ce fait en l'attribuant à une condensation électrique de même nature que celle qui a lieu dans la bouteille de Leyde. Comme la condensation augmente beaucoup, à mesure que diminue l'épaisseur du corps isolant, séparant les deux conducteurs qui s'influencent réciproquement, il en résulte que l'influence de la condensation se fait déjà sentir avec des instruments un peu délicats, quand on intercale dans le circuit et près de l'origine du courant un condensateur ordinaire. C'est ce que MM. Fizeau et Gounelle avaient observé lors de leurs expériences sur la vitesse de propagation du courant dans les fils isolés sur des poteaux.

La tension variable aux divers points du conducteur étant, avec la conductibilité, ce qui détermine la propagation du courant, il

en résulte que tout ce qui modifie ces deux éléments modifie aussi cette propagation. Ainsi, un fil attaché en un point quelconque du conducteur devant prendre en chacun de ses points, s'il est isolé, la tension du conducteur principal au point d'attache, il absorbera, pour se charger, une partie de l'électricité qui devait servir à l'établissement du courant définitif et modifiera, en la ralentissant, la propagation de ce courant. Cette influence est d'autant plus considérable que ce fil sera plus gros, plus conducteur et plus long. Elle augmentera aussi avec la position du point d'attache ; car plus ce point sera rapproché de l'origine du courant, plus sa tension, et par suite celle du fil dérivateur, sera considérable, ce qui augmente la quantité d'électricité qu'il absorbe en pure perte pour la propagation du courant. En outre, la résistance du conducteur principal, à partir du point d'attache, et celle du fil dérivateur ayant une influence sur la manière dont se fait entre eux le partage du courant provenant de la partie du fil plus rapprochée de l'origine, ces résistances ont une influence marquée sur la propagation du courant définitif et des courants temporaires et variables qui préexistent à son établissement. Il est clair que si le fil dérivateur était dans le cas des fils sous-marins ou souterrains, son influence serait beaucoup plus appréciable.

De cette observation résulte que dans le cas de lignes à plusieurs fils qui, par leur longueur ou leur mode d'établissement, présentent d'une manière sensible pour la transmission des signaux, un retard dans la propagation du courant jusqu'à leur extrémité, il ne sera pas indifférent de réunir à leurs deux extrémités ou de ne pas réunir les fils qui, par accident, se trouveraient mêlés en un point quelconque de leur parcours ; Dans ce cas, la réunion de ces fils aux deux extrémités de la ligne devra toujours avoir lieu. Il est également clair qu'il

faudra éviter avec soin tout contact avec des fils qui, du reste, seraient isolés : une masse métallique un peu considérable présenterait le même inconvénient. Un grand nombre de fils d'égale longueur ou de masses métalliques semblables influeraient sur la propagation du courant électrique, de la même manière que l'induction produite par le milieu dans lequel se trouvent plongés les fils isolés des lignes sous-marines ou souterraines.

Si, au lieu d'être isolé, le fil dérivateur était en communication avec la terre par son extrémité, il influencerait encore la propagation du courant par la quantité d'électricité dont ce fil se chargerait et par la perte d'électricité que le fil engendrerait. Si la communication avec la terre avait lieu par un fil court, mais très-résistant, exigeant par conséquent une quantité fort minime d'électricité pour se charger, alors la perte d'électricité proportionnelle à la tension au point d'attache est la seule chose qui ait une influence sensible sur la manière dont le courant se propage. La position de la dérivation fera varier son action, et quand des pertes existent tout le long d'un conducteur, la propagation du courant doit être profondément modifiée.

Lorsqu'un conducteur se compose de plusieurs fils de section ou de conductibilité différente, le courant ne s'y propage plus de la même manière que si le fil était identique dans toute sa longueur ; la section du fil et peut-être sa nature modifiant la quantité d'électricité nécessaire pour le charger à une tension déterminée, et sa conductibilité modifiant la différence des tensions nécessaires pour établir un courant donné entre les tranches voisines. Ainsi, quand le conducteur se compose de deux fils de sections différentes attachés bout à bout, le courant se propage plus ou moins vite, selon que son origine est sur le fil le plus gros ou sur le plus fin. En effet, dans le premier cas l'électricité

éprouve moins de résistance pour charger soit le gros fil, soit le petit, excepté pour la dernière tranche, et l'inverse aurait lieu dans l'autre cas. Il en serait de même pour le cas où la conductibilité serait différente pour les deux fils.

Le cas de conducteurs composés de parties hétérogènes est celui des transmissions ordinaires. On peut, en général, ne tenir compte des conducteurs liquides et solides de la pile et du fil de l'électro-aimant que pour leur résistance ; mais cette résistance influe sur la marche du courant. De là résulte que si l'on veut faire varier soit le nombre des éléments et leur grandeur, soit la finesse du fil de la bobine, de manière à obtenir le maximum de rapidité des oscillations de l'armature de l'électro-aimant, il faut tenir compte de cette influence des résistances extrêmes sur la propagation du courant : aussi trouverait-on des dimensions différentes de celles que nous avons trouvées précédemment pour le cas du magnétisme produit par un courant établi d'une manière définitive. Toutes les observations que nous venons de faire pour le cas de l'établissement du courant ont encore lieu pour celui de la cessation de ce courant.

CHAPITRE III.

DES TRANSMISSIONS TÉLÉGRAPHIQUES.

§ 1^{er}.NOTIONS GÉNÉRALES SUR LES DIVERS APPAREILS EMPLOYÉS EN
TÉLÉGRAPHIE.

Les signaux de la télégraphie électrique sont produits par les interruptions ou par les inversions répétées d'un courant. Les appareils qui servent à produire ces interruptions ou ces inversions de courant en nombre et en temps convenable pour produire les signaux, portent le nom de récepteurs. Il arrive quelquefois que, par suite de la longueur de la ligne ou par le mauvais état dans lequel elle se trouve, les courants ne peuvent arriver à son extrémité avec une intensité suffisante pour faire marcher le récepteur ; on établit alors, en un ou plusieurs points intermédiaires, des appareils appelés relais, qui n'ont pour but que de transmettre à l'appareil suivant le courant d'une nouvelle pile, et qui sont mis en activité par le courant dont on veut limiter le parcours pour en éviter l'affaiblissement trop considérable. Beaucoup de récepteurs exigent pour fonctionner, un courant trop fort pour pouvoir être mis en mouvement par l'action directe du courant qui lui est transmis par le poste voisin ; on se sert alors d'un relais qui, recevant le courant de ligne, ferme le circuit d'une pile locale dont le courant fait fonctionner l'appareil qui exige un courant considérable. Le courant de la

pile locale peut, par l'augmentation du nombre et de la grandeur des éléments, être renforcé à volonté ; il n'est d'ailleurs pas affaibli par la résistance qui provient de la longueur du conducteur qui l'amène au récepteur. Quand on se sert d'appareils à relais, ce ne sont pas les relais eux-mêmes qui, dans la translation, transmettent le courant de la nouvelle pile au poste suivant, mais le récepteur lui-même. La force qui met en mouvement ce dernier étant considérable, les contacts nécessaires pour établir la continuité du conducteur de la nouvelle pile sont mieux assurés et offrent par conséquent plus de sûreté pour une bonne transmission.

Enfin, il est nécessaire, dans beaucoup de cas, de faire précéder les transmissions d'un bruit tel que celui d'un timbre pour appeler l'attention de l'employé qui doit recevoir la dépêche ; ce mode d'appel est surtout utile pour le service de nuit. Les appareils destinés à produire ce bruit portent le nom de sonnerie ; ce sont des espèces de télégraphes dans lesquels le courant, au lieu de produire des signaux variés, n'en produisent qu'un seul, toujours le même, et qui est perçu par l'oreille.

Les manipulateurs ont une forme qui dépend tout à fait du récepteur, aussi n'en donnerons-nous une description que dans le chapitre où nous décrirons en détail ces derniers appareils. Quelle que soit la forme du manipulateur, il n'est en définitive qu'un interrupteur ou un inverseur, remplissant la même fonction que ceux dont nous avons donné la description page 70 et suivantes. Si ce ne sont que des interrupteurs, ils ne doivent avoir que trois boutons : l'un que nous appellerons bouton de ligne, parce que c'est à ce bouton que vient aboutir le fil de la ligne ; le second s'appellera bouton de pile, il communique avec le pôle positif ou pôle cuivre de la pile ; enfin au troisième doit

s'attacher un fil qui communique avec la terre pour recevoir le courant transmis par le correspondant pendant le repos du manipulateur.

Il est évident que, puisque le récepteur doit recevoir le courant de la ligne pour le conduire à la terre en recevant de lui la trace indicatrice de son passage, il devra être en communication d'une part avec la terre, d'autre part avec la ligne. Pour que la communication avec ce dernier fil eût lieu sans intermédiaire, il faudrait qu'il fût intercalé dans le fil de ligne, auquel cas le manipulateur, à l'état de repos, devrait établir la communication du fil de ligne avec la terre, afin que le circuit fût établi pour les courants envoyés par le correspondant que devrait recevoir le récepteur. Cet appareil se trouverait donc placé entre le manipulateur et la ligne, et recevrait les courants envoyés par ce dernier. Il recevrait donc à la fois et les courants envoyés par le poste dans lequel il se trouve et ceux qu'on y envoie ; il en résultera que pendant une transmission on ne pourrait distinguer facilement si le correspondant veut ou non interrompre la transmission. La réception, dans son propre récepteur du courant transmis par le poste est au moins inutile, car la marche de cet appareil ne peut, en aucune façon, faire connaître la marche du récepteur correspondant, et on obligerait, en outre, le même récepteur à recevoir des courants fort inégaux ; car, d'une part, il recevrait le courant de son poste intégralement, sans les diminutions apportées par les dérivations provenant du mauvais isolement des fils de ligne, d'autre part il recevrait le courant du correspondant affaibli par toutes les pertes qu'il aurait subies sur la ligne. C'est une question des plus délicates que celle de faire marcher un appareil au moyen de courants variés, sans réglage à chaque changement un peu notable du courant : en tout cas, c'est une complication gratuite introduite dans le système. On ne pourrait

d'ailleurs établir par une dérivation au delà du manipulateur la communication du récepteur avec le fil de ligne, car dans ce cas il recevrait encore le courant du manipulateur qui l'accompagne, mais par dérivation et d'une manière très-fâcheuse, puisque le récepteur seul ayant inévitablement moins de résistance que son correspondant augmenté du fil de ligne, il recevrait un courant bien plus énergique que celui qui serait envoyé sur la ligne. Il résulte de ces considérations qu'inévitablement le récepteur doit être intercalé dans le fil de terre du manipulateur en communiquant d'une part avec la terre, et d'autre part avec le manipulateur au moyen du bouton de terre de ce dernier. Par ce moyen, d'une part, quand le manipulateur sera au repos, il mettra le fil de ligne en communication avec la terre par l'intermédiaire du récepteur ; d'autre part, pendant l'envoi du courant par le manipulateur, le récepteur ne se trouvera plus en communication avec le fil de ligne et ne recevra plus le courant de la pile de son propre poste.

Nous donnerons au troisième bouton du manipulateur le nom de bouton du récepteur. Les deux boutons de ce dernier devront porter le nom de bouton de ligne et bouton de terre. Il est seulement bien entendu que le fil de ligne du récepteur comprend le manipulateur. Nous indiquerons par la suite ces boutons par les lettres suivantes : L_m bouton de ligne du manipulateur, P_m bouton de pile, R_m bouton de récepteur ou de terre, L_r bouton de manipulateur du récepteur ou bouton de ligne, T_r son bouton de terre. Les lettres *m* et *r* placées au bas des grandes lettres sont des *indices* et servent à indiquer à quel appareil appartiennent les pièces que ces lettres désignent.

Lorsque le manipulateur est un inverseur, alors dans deux positions alternatives, il doit mettre le fil de ligne en communica-

tion successivement avec les deux pôles de la pile, l'autre pôle étant en communication avec la terre. La position intermédiaire, qui est celle du repos, doit être réservée pour la réception, et en cet état le fil de ligne doit être en communication avec le récepteur. Le manipulateur portera donc dans ce cas cinq boutons, savoir : un bouton pour le fil de ligne L_m , un pour le pôle cuivre de la pile C_m , un autre pour le pôle zinc Z_m , un pour la terre de la pile T_p , enfin un cinquième pour le récepteur ou le fil de terre du manipulateur R_m .

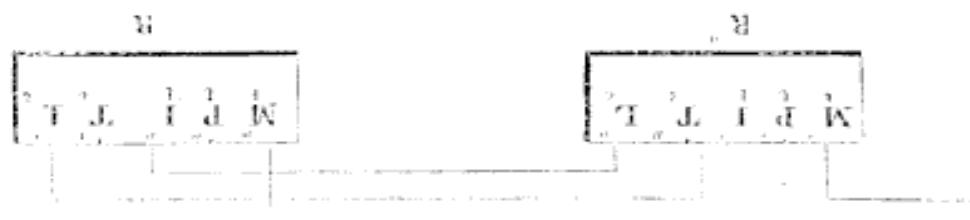
Quand un appareil sert de relais pour transmettre le courant à un appareil éloigné, outre ses boutons ordinaires de réception L_r et T_r , il doit encore avoir deux autres boutons, un pour le fil de la pile P_t , ou pile de translation, et un autre pour le fil de ligne dans lequel il doit envoyer le courant de cette pile L_t et que nous appellerions bouton de ligne pour la translation, s'il n'était déjà connu sous le nom de bouton du massif de l'appareil M_t , parce que c'est à travers tout le massif de l'appareil que se fait cette communication. Le relais sert donc de véritable manipulateur pour cette nouvelle ligne en même temps que de récepteur pour la première ligne. Il faudra donc un nouvel appareil servant de récepteur pour la deuxième ligne et de manipulateur pour la première, pour que des deux lignes, l'une puisse transmettre à l'autre en translation et réciproquement, car un même manipulateur ne peut servir pour deux lignes non plus qu'un même récepteur.

En se reportant à ce que nous avons fait voir pour les appareils simples, c'est-à-dire en observant que tout récepteur doit être intercalé entre le manipulateur et la terre, et que, par suite, le bouton de ligne doit être attaché à un bouton du manipulateur qui ne communique avec le fil de ligne que quand ce dernier

appareil est à l'état de repos, on verra que le relais doit avoir un troisième bouton correspondant au bouton R_m du manipulateur et que nous désignerons, comme dans les appareils Morse, par la lettre I_r , parce qu'il sert à isoler le récepteur de la ligne pendant l'envoi du courant dans cette dernière.

Spécifions par le signe ' les appareils et leurs diverses pièces, servant pour la première ligne, et par le signe " ceux de la seconde ligne. Le relais R' sert donc de récepteur pour la

FIGURE 21.

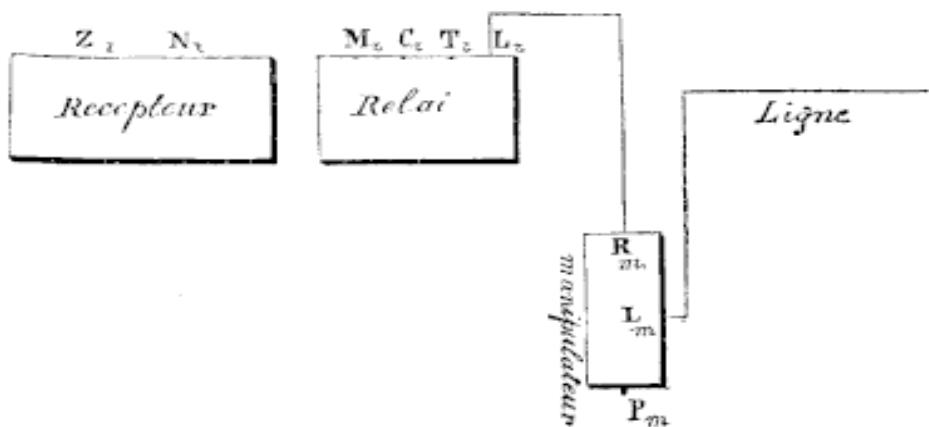


première ligne et de manipulateur pour la seconde ; le relai R' sert de récepteur pour la seconde ligne et de manipulateur pour la première ; il faut donc que le fil de la première ligne soit attaché au bouton M_r de l'appareil R' , et qui est le bouton de ligne de cet appareil, quand il fonctionne comme manipulateur. I_r étant dans ce cas, son bouton de récepteur devra être relié à la borne L_r de l'appareil R' , laquelle lui sert de bouton de ligne quand il fonctionne comme récepteur. Réciproquement, la seconde ligne doit être attachée au bouton M_r , borne de ligne du relais R' fonctionnant comme manipulateur, et la borne I_r , bouton du récepteur de ce même appareil, agissant de la même manière, devra être reliée à la borne L_r , bouton de ligne du relais R' quand il fonctionne comme récepteur.

Si l'appareil ne servait de relais que pour la pile locale, il ne

fonctionnerait comme récepteur ou comme manipulateur que pour un seul appareil placé dans le poste, et la transmission par relais ne se ferait que dans un seul sens, ce qui simplifierait l'appareil, qui, alors, n'aurait pas besoin d'être double.

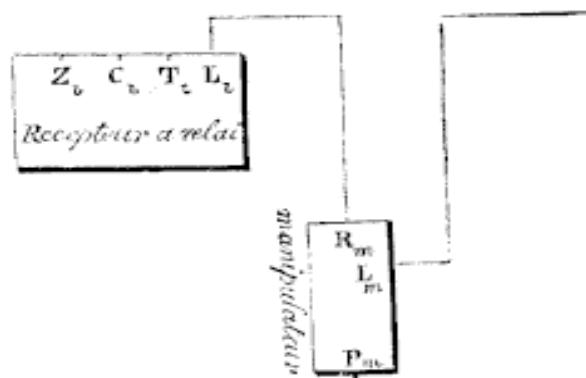
FIGURE 22.



Le relais aurait quatre boutons, deux T_r et L_r , pour le faire servir comme récepteur de ligne, et deux, M_r et C_r , pour lui faire servir de manipulateur pour le circuit formé de la pile locale et du récepteur. Ce dernier n'aurait que deux boutons, un pour l'entrée du courant N_r , l'autre pour la sortie Z_r . Le fil de ligne s'attache toujours au bouton L_m du manipulateur, la pile de ligne au bouton P_m ; on réunit le bouton R_m du manipulateur au bouton de ligne L_r du relais, son bouton T_r étant relié à la terre. Quand le relais fonctionne, il réunit métalliquement les deux bornes M_r et C_r et complète le circuit dont ils sont les deux extrémités. En C_r se trouve attaché le pôle le cuivre de la pile locale, qui alors est mis en relation avec M_r quand le relais fonctionne, et par suite avec N_r du récepteur qui est joint à M_r par un fil de jonction: l'autre pôle de la pile est attaché au bouton Z_r du récepteur, de sorte que la réunion métallique des deux bornes

M_r et C_r par le relais, ferme le circuit composé de la pile locale et du récepteur, ce qui fait fonctionner ce dernier. Lorsque le manipulateur envoie le courant sur la ligne, il enlève toute communication du relais avec la ligne, de sorte que cet appareil et le récepteur ne fonctionnent ni l'un ni l'autre. On peut réunir en un appareil le récepteur et le relai, alors les bornes M_r et N_r sont enlevées, la communication se faisant directement par des lames de communication placées sous l'appareil. La figure ci-dessous indique la disposition; les mêmes lettres représentent les mêmes objets que dans la figure précédente.

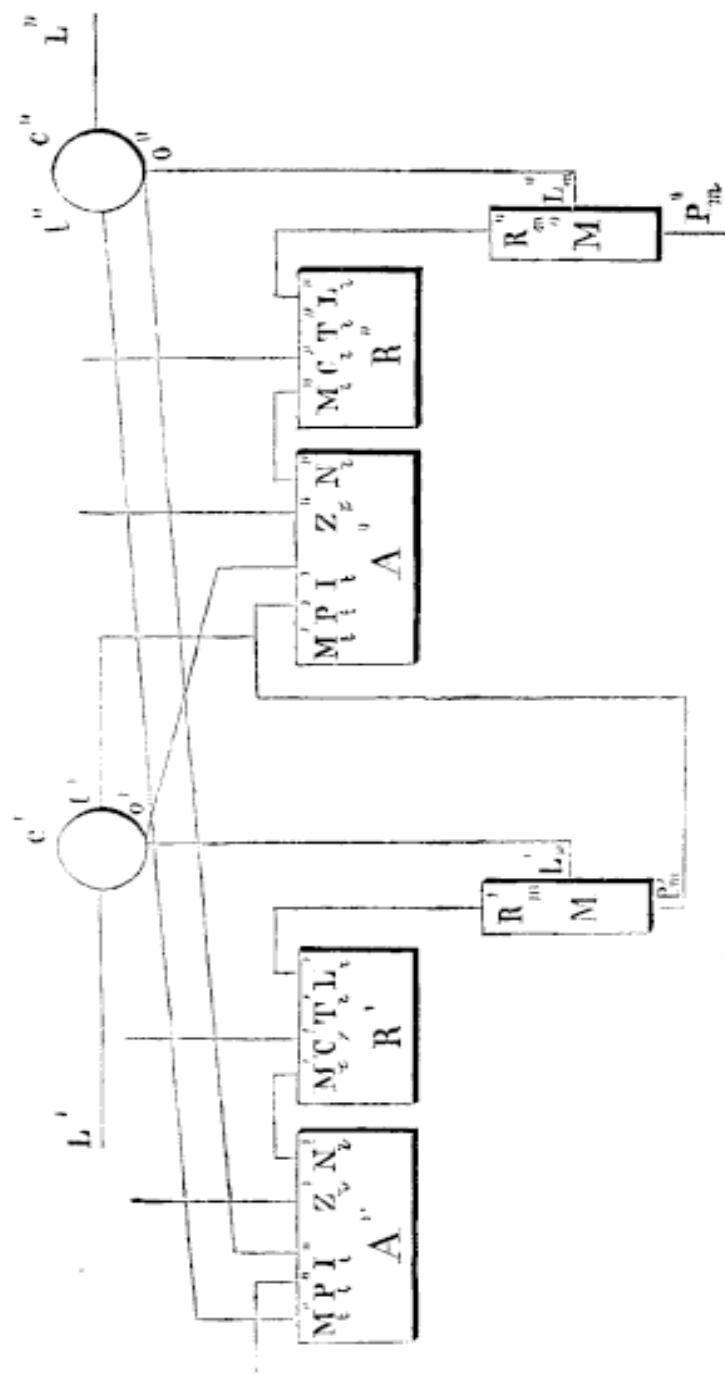
FIGURE 23.



Le plus souvent, la translation, c'est-à-dire la transmission des signaux entre deux postes par les courants de piles placées dans des postes intermédiaires, se fait au moyen des appareils de réceptions de ces mêmes postes, appareils qui sont à relais. Ces appareils servent alors à une double fin, comme récepteurs ordinaires et comme translateurs, et la translation peut se faire soit au moyen du récepteur proprement dit, soit au moyen de son relais. Nous allons indiquer successivement les deux dispositions en supposant le relais séparé du récepteur et en indiquant quelle modification apportera la réunion en un seul de ces deux appareils.

Supposons d'abord que ce soit le récepteur qui doive établir

FIGURE 24.



lui-même la translation. Nous sommes dans un poste intermédiaire où doivent aboutir deux lignes que nous appellerons pre-

mière et seconde, en indiquant par le signe ' les parties d'appareils qui correspondent à la première, et par " celles qui correspondent à la seconde. Les manipulateurs sont désignés par la lettre M, les relais par la lettre R, et les récepteurs par la lettre A.

En service ordinaire, le fil de ligne est attaché au bouton de ligne du manipulateur qui lui correspond, L' avec L'_m et L" avec L''_m ; en outre, les boutons L_r du relais et R_m du manipulateur sont reliés entre eux. Lorsque ces appareils sont établis en translation par les récepteurs, A' étant mis en mouvement par le courant de la ligne L', sert de manipulateur pour la ligne L", et A" mis en mouvement par le courant de la ligne L", sert de manipulateur pour la ligne L'. Il faut donc que L' soit attaché au bouton de ligne de l'appareil A", qui, comme nous l'avons vu, est le bouton du massif M''_t ; de même L" doit être attaché au bouton du massif M_t de l'appareil A'. Les boutons de réception de ces appareils A' et A", qui sont I'_t et I''_t , doivent être attachés aux boutons de ligne L'_r et L''_r des appareils récepteurs des lignes L" et L'; mais au lieu de les attacher directement à ces boutons, on les attache au fil qui arrive aux boutons de ligne des manipulateurs ordinaires M'' et M' ; de cette manière, le poste établi en translation peut toujours parler à ses correspondants.

Il faut donc pour passer de la transmission ordinaire à la translation détacher les fils de ligne des fils qui conduisent aux boutons de ligne des manipulateurs correspondants pour les attacher à un fil relié au massif du récepteur de l'autre fil. Ce changement se fait au moyen de deux commutateurs à deux boutons C, C"; les fils L' et L" sont attachés aux boutons du massif de ces commutateurs; aux deux boutons de commutation sont attachés les fils des massifs du manipulateur correspondant et du récepteur de l'autre fil; de cette manière, par un simple changement des manivelles des deux com-

mutateurs, on établira, soit la communication ordinaire, soit la transmission par translation.

Suivons maintenant la marche du courant dans ces deux cas. Le courant arrive, je suppose, par le ligne L' : si le ressort du commutateur C' est placé sur la touche O' , le courant arrive par le bouton L'_m dans le massif du manipulateur, passe au bouton R'_m , de là entre dans le relais R' par le bouton L'_r , et en sort pour se perdre à la terre par le bouton T'_r . Il fait fonctionner ce relais qui, en établissant la communication métallique des boutons M'_r et C'_r , ferme le circuit formé par la pile locale et le récepteur A' . Ce récepteur fonctionne et met ainsi en communication métallique M'_r avec le pôle P'_t de la pile de translation de la ligne L' , pile qui est, du reste, la même que celle de la transmission ordinaire sur la même ligne. M'_r est relié par un fil à la touche t' , mais cette dernière est isolée n'étant pas en communication avec le ressort du commutateur C'' , qui est sur la touche O'' , le courant ne peut donc être envoyé sur la ligne L'' . Si, au contraire, les deux commutateurs C' et C'' eussent eu leurs ressorts sur les touches O' et O'' , le courant venant de la ligne L' serait encore entré dans le manipulateur M' , et aurait fait fonctionner le relai et le récepteur comme précédemment ; seulement la communication de la ligne avec le bouton L'_m du manipulateur M' aurait eu lieu par le bouton T' du commutateur C' , la borne M'_t du récepteur A' , la borne I'_t du même récepteur, et enfin la touche O' qui, isolée du ressort de C' , ne sert plus qu'à joindre la borne I'_t du récepteur A'' à la borne L'_m du manipulateur M' . Les bornes M'_t et I'_t de l'appareil A'' sont d'ailleurs réunies métalliquement quand cet appareil ne fonctionne pas. Le relais R' et son récepteur A' fonctionnant, le courant envoyé par la borne P'_t dans le massif et au commutateur C' , n'est plus arrêté à la touche t' de ce dernier, car le ressort se trouve placé sur elle et la met en

communication avec la ligne L'' qui par suite reçoit le courant que lui envoie le récepteur A'' .

Quand on est en transmission ordinaire, les ressorts C' et C'' étant sur les touches O' et O'' , on voit facilement que la transmission se fera également bien si le poste où se trouve ces appareils transmet à ses correspondants. Supposons que le poste que nous considérons envoie son courant à son correspondant par le manipulateur M' , alors les bornes P_m' et L_m' de ce manipulateur sont reliées métalliquement et le courant est envoyé au bouton S . Là, deux voies lui sont offertes, l'une formée du fil de jonction de la borne O' et du bouton I_t du récepteur A'' , de la communication métallique qui a lieu entre ce bouton et le bouton M_t quand l'appareil A'' ne fonctionne pas, enfin du fil de jonction de la borne M_t avec le bouton T du commutateur C' ; mais là cette voie se trouve interrompue, le ressort du commutateur C' n'étant pas sur la touche T . Au contraire, l'autre voie offerte en O' le courant envoyé, continue à exister, car à partir de ce bouton elle se compose du ressort du commutateur C'' de la ligne L' des appareils du poste correspondant, enfin de la terre de ce poste où le courant se perd. Il en serait de même si le courant était envoyé par le manipulateur M'' sur la ligne L'' .

Dans le cas de la translation, le poste translateur peut encore communiquer avec ses correspondants. Dans ce cas, les ressorts des commutateurs C' et C'' sont sur les touches T' et T'' . Supposons que le courant soit envoyé par le manipulateur M' ; le bouton de pile de ce manipulateur est réuni métalliquement avec la borne L_m' , cette dernière par un fil à la borne O' qui, isolée du ressort n'a plus de communication qu'avec le bouton M_t du récepteur A'' . Quand ce récepteur ne fonctionne pas, cette borne M_t communique avec la borne I_t , laquelle par l'intermédiaire du commu-

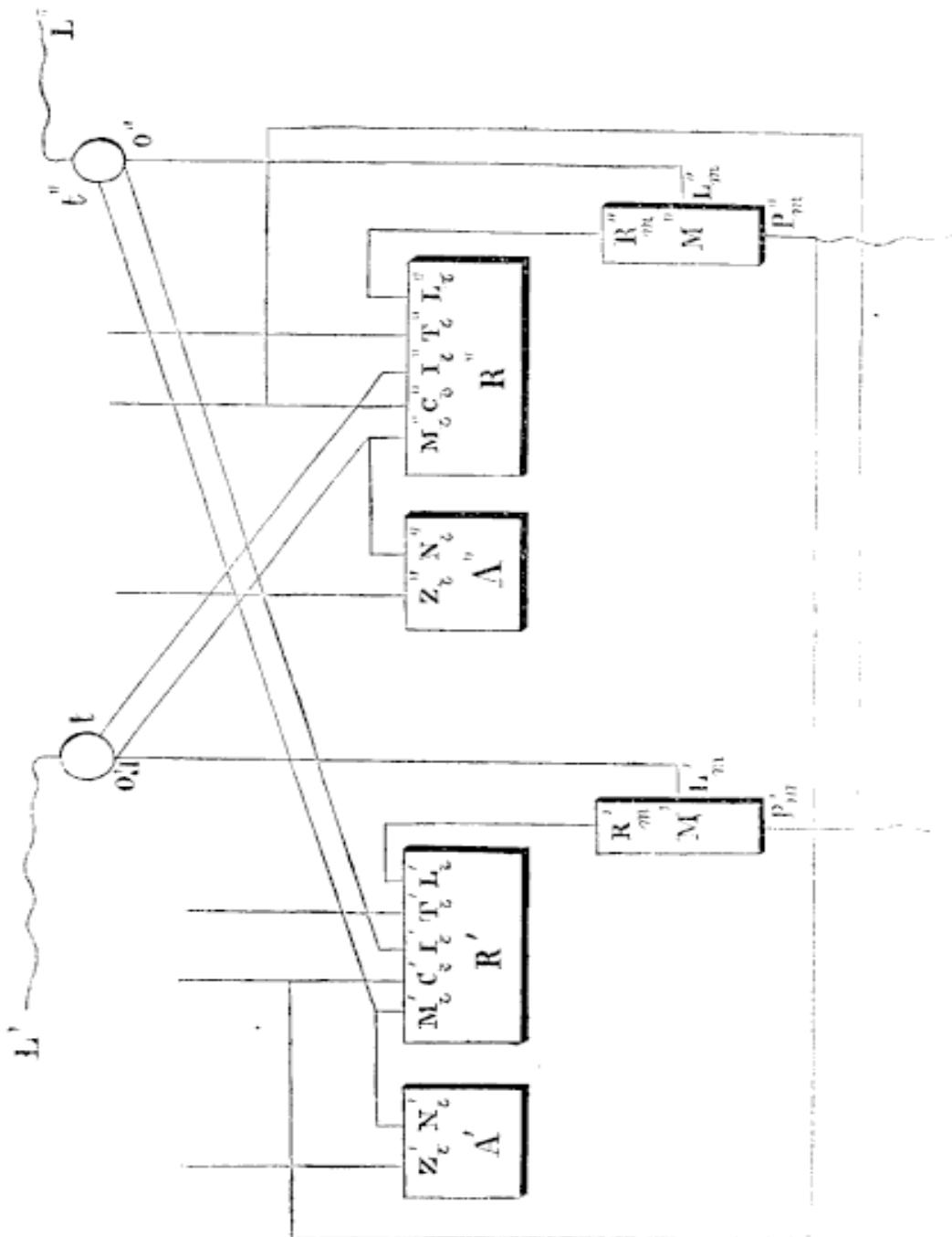
tateur C' est reliée à la ligne L' sur laquelle le courant du manipulateur M' se trouve envoyé. Il en serait de même pour l'envoi du courant par le manipulateur M" sur la ligne L"; mais quand ce sont les correspondants du poste translateur qui envoient le courant, tous les appareils fonctionnent ainsi que ceux du correspondant qui n'envoie pas son courant. Si le relais et le récepteur sont réunis sur la même planchette, les bornes N_r et M_r disparaissent, la communication se faisant directement sur la planchette.

La translation au moyen des récepteurs a, dans beaucoup d'appareils employés, l'inconvénient de ralentir les transmissions, parce que chacun d'eux n'envoie le courant au suivant que quelque temps après qu'il a reçu de celui qui lui transmet, tandis qu'il cesse de l'envoyer aussitôt qu'il cesse de recevoir; on pourrait donc trouver avantage à se servir des relais pour établir la translation. Voici comment les choses devraient alors être disposées. (Voir la figure 25, page 102.)

Les récepteurs n'auraient plus que deux boutons, l'un pour le pôle zinc, l'autre pour le fil de communication avec le relais, fil que l'on détacherait pendant la translation. Les relais devant servir de manipulateur à un double système de transmission, envoi et réception de courant, devraient avoir outre le bouton de ligne et le bouton de terre, trois autres boutons, dont deux servent déjà pour les transmissions ordinaires; ce sont les boutons M_r et C_r; le troisième I_t, ne servirait que pour les translations et ne serait en relation avec le massif de l'appareil ou la base M_r que lorsque le relais serait à l'état de repos. Les commutateurs étant disposés comme dans la translation par les récepteurs, les fils de ligne seraient attachés aux bornes M'_r et M"_r par l'intermédiaire des touches t' et t" des commutateurs: les bornes I'_t et

I_t seraient reliées aux touches o' , o'' des commutateurs et, par

FIGURE 25.

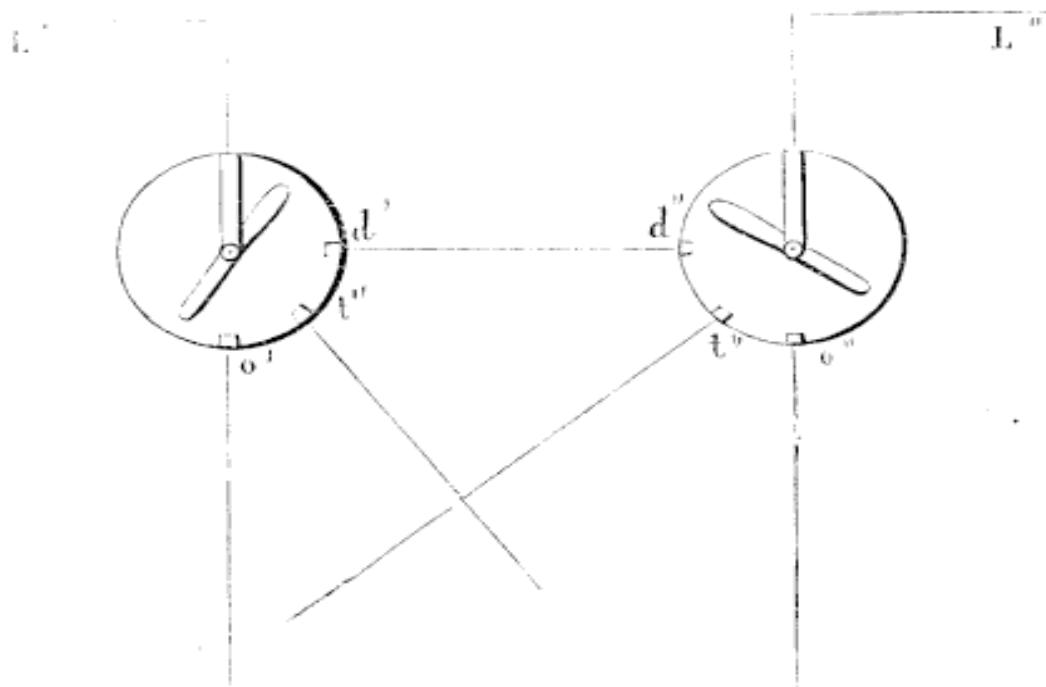


suite, aux fils de ligne des manipulateurs, en ayant soin de détacher des bornes N_r et N''_r les fils qui relient les relais aux ré-

cepteurs. La figure est suffisante pour comprendre la marche du courant, qui est tout à fait semblable à celle de la translation au moyen des récepteurs ; nous n'entrerons donc pas dans plus de détails.

Ce mode de transmission par translation permet, sans l'intermédiaire, toujours fâcheux, d'une manipulation à la main, de transmettre sur des lignes qui n'ont pas de fils directs, mais seulement des fils s'arrêtant de station en station. Toutefois, quand les lignes ne sont pas trop longues, il vaut mieux relier les fils entre eux dans les stations intermédiaires, pourvu qu'on ait, d'ailleurs, un moyen facile de faire rentrer à volonté ces stations dans le circuit. Il suffit pour cela d'ajouter aux commutateurs de la fig. 25 une troisième touche et de réunir entre elles par un fil ces deux nouvelles touches ainsi produites,

FIGURE 26.

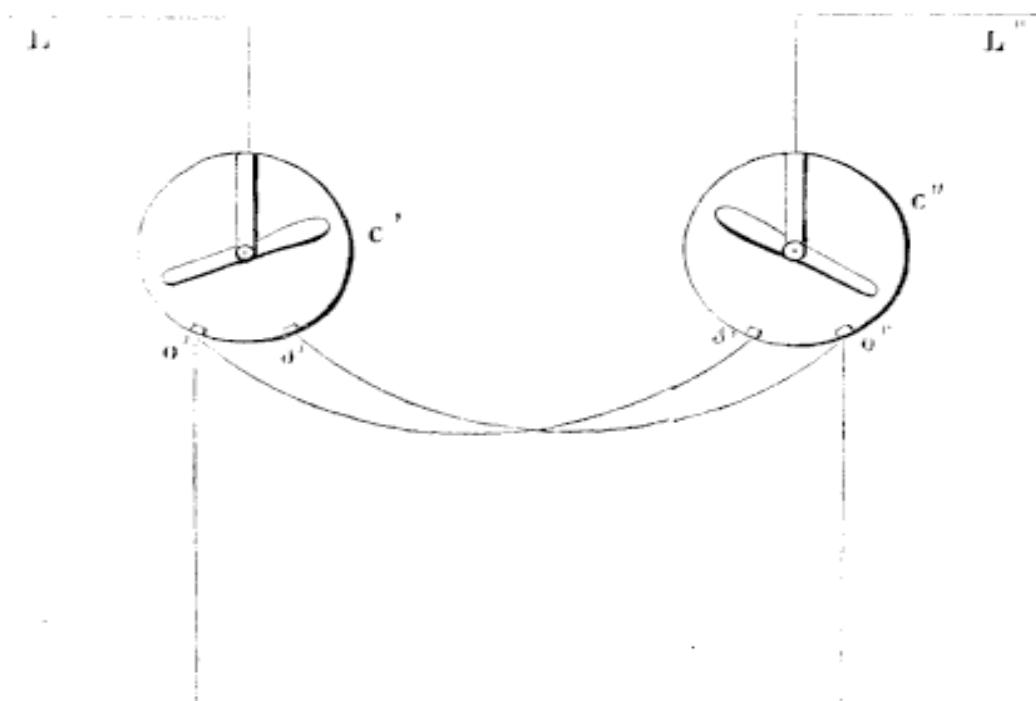


Selon que l'on mettra les ressorts des deux commutateurs sur les

touches o' , o'' ou t' , t'' ou bien d' , d'' , on aura la communication ordinaire, par translation ou directe.

La translation réalise aussi la communication simultanée, c'est-à-dire que quand les postes intermédiaires d'une ligne sont tous établis en translation, une même dépêche peut être reçue par toutes les stations de cette ligne. On a quelquefois établi la communication simultanée de deux manières différentes. Dans la première, chaque station intermédiaire recevait le courant dérivé de la ligne principale; deux commutateurs suffisent pour établir ce mode de transmission.

FIGURE 27.

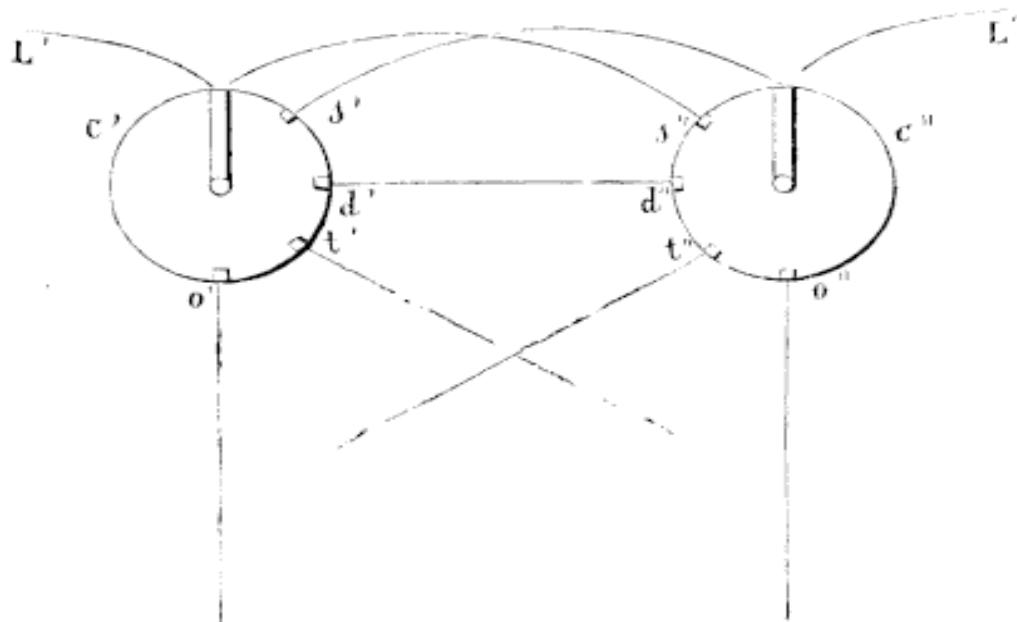


Chacun de ces appareils aurait deux touches, o' , s' pour le premier, o'' , s'' pour le second; o' est relié avec s'' et o'' avec s' . On voit qu'en mettant un des ressorts des commutateurs sur l'une ou l'autre des deux touches, de manière que chacun d'eux

soit sur une touche de lettre différente, l'un ou l'autre des appareils recevra le courant dérivé de la ligne. Supposons que le ressort du commutateur c' soit placé sur la touche o' et le commutateur c'' sur la touche s' ; on voit que les deux lignes sont réunies par l'intermédiaire de la touche s'' du fil qui joint s' à o' et du commutateur c' , mais qu'en o' il existe un fil qui dérive une partie du courant de la ligne dans les appareils ordinaires de la ligne L' . — Si le ressort de c' eût été placé sur s' et le ressort de c'' sur o'' , l'appareil de la ligne L'' eût fonctionné par le courant dérivé.

Au moyen d'un quatrième bouton adapté aux commutateurs de la figure, ce mode de transmission aurait pu également se faire.

FIGURE 28.



On voit en effet qu'en établissant comme précédemment le ressort de c' sur s' et celui de c'' sur o' , ou, inversement, le ressort de c' sur o' et celui de c'' sur s' , on aurait aux boutons s' ou s'' établi la liaison des deux lignes, et par les boutons o' ou o''

dérivé une partie du courant de ligne dans l'appareil de la ligne L' ou dans celui de la ligne L'' .

La loi que nous avons donnée pour les courants dérivés, loi qui dit que le courant se partage dans le reste du fil et dans la dérivation en raison inverse des résistances, nous fait voir que pour un tel mode de transmission il faut que les récepteurs des diverses stations intermédiaires présentent de grandes résistances au courant. En effet, ces résistances sont nécessairement égales; appelons-les R_1 R_2 et appelons L_1 L_2 L_3 les longueurs réduites des lignes qui séparent les stations entre elles, et prenons pour exemple quatre stations. La dernière recevra entièrement le courant X_4 que lui envoie la ligne, et, à partir de la station 3, le courant éprouve une résistance égale à $L_4 + R_4$. A cette troisième station, le courant se partage en raison inverse des résistances qu'il éprouve: 1^o $L_4 + R_4$ sur la ligne, et 2^o R_3 dans la dérivation. Si X_4 est le courant qui va de la troisième à la quatrième station, X_3 celui de la seconde à la troisième et Y_3 celui qui entre dans la troisième, on aura la proportion

$$Y_3 : X_4 :: L_4 + R_4 : R_3$$

d'où résulte :

$$Y_3 + X_4 : L_4 + R_4 + R_3 :: Y_3 : L_4 + R_4 \\ :: X_4 : R_3$$

Ce qui donne, en remarquant que $Y_3 + X_4 = X_3$, les valeurs suivantes de Y_3 et X_4

$$X_4 = \frac{R_3 X_3}{L_4 + R_4 + R_3} \\ Y_3 = \frac{(L_4 + R_4) X_3}{L_4 + R_4 + R_3}$$

Et si nous désignons par L'_4 L'_3 L'_2 L'_1 les longueurs réduites

de l'ensemble des conducteurs ou résistances qu'éprouve le courant à partir de la 4^e, de la 3^e, de la 2^e et de la 1^{re} station, L' étant la longueur réduite totale, on aura :

$$L'_4 = R_4$$

$$L'_3 = \frac{(R_4 + L_4) R_3}{L_4 + R_4 + R_3}.$$

Donc, en déduisant de ces dernières équations les valeurs en L'_4 et L'_3 des quantités $\frac{L_4 + R_4}{L_4 + R_4 + R_3}$ et $\frac{R_3}{L_4 + R_4 + R_3}$, et les reportant dans les valeurs de X_4 et Y_3 , on aura pour ces mêmes quantités

$$X_4 = \frac{X_3 L'_3}{L_4 + R_4}$$

$$Y_3 = \frac{X_3 L'_3}{R_3}.$$

De même, à partir de la seconde station, le courant X_2 qui lui arrive, se partage entre le fil de l'appareil de cette station et le fil de ligne, en raison inverse de leurs résistances R_2 et $L_3 + L'_3$, qui représente la résistance du circuit à partir de cette seconde station, sa résistance non comprise, ce qui donne la proportion

$$Y_2 : X_3 :: L_3 + L'_3 : R_2 ;$$

d'où, comme $Y_2 + X_3 = X_2$, on aura :

$$X_3 = \frac{R_2 X_2}{L_3 + L'_3 + R_2}$$

$$Y_2 = \frac{(L_3 + L'_3) X_2}{L_3 + L'_3 + R_2}$$

et la résistance du circuit à partir de la seconde station incluse, sera :

$$L'_2 = \frac{(L_3 + L'_3) R_2}{L_3 + L'_3 + R_2},$$

d'où résulteront, pour les valeurs de X_3 et Y_2 , les quantités suivantes :

$$X_3 = \frac{X_2 L'_2}{L_3 + L'_3}$$

$$Y_2 = \frac{X_2 L'_2}{R_2}.$$

En poursuivant le même mode de raisonnement, on trouverait la proportion :

$$Y_4 : X_2 :: L_2 + L'_2 : R_2$$

$$\text{et} \quad Y_4 + X_2 = X_4,$$

$$\text{d'où} \quad X_2 = \frac{X_4 R_4}{L_2 + L'_2 + R_4}$$

$$Y_4 = \frac{X_4 (L_2 + L'_2)}{L_2 + L'_2 + R_4}$$

$$\text{On trouve aussi} \quad L'_4 = \frac{(L_2 + L'_2) R_4}{L_2 + L'_2 + R_4}$$

d'où résulte enfin :

$$X_2 = \frac{X_4 L'_4}{L_2 + L'_2}$$

$$Y_4 = \frac{X_4 L'_4}{R_4}$$

Enfin X_4 étant le courant envoyé par la pile, nous pouvons le désigner par X , et on aura

$$X_4 = X$$

Si nous examinons ces diverses valeurs de X et Y , nous remarquerons qu'à partir de X , X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , vont en diminuant, car chacun est égale à la précédente, multipliée par une quantité plus petite que l'unité. Quant aux quantités Y_1 , Y_2 , Y_3 , Y_4 :

elles seront en général différentes les unes des autres, car L'_1 , L'_2 , L'_3 , n'ont aucun liaison déterminée entre elles.

Habituellement les appareils offrent la même résistance dans toutes les stations; dans ce cas, le courant qui passe dans les appareils va en diminuant de la première station à la dernière. Désignons par R cette résistance commune; si nous remplaçons donc les valeurs de Y_1 , Y_2 , Y_3 , Y_4 , trouvées précédemment, par leurs valeurs X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , on aura :

$$\begin{aligned} Y_1 &= \frac{X L'_1}{R} \\ Y_2 &= \frac{X L'_1 L'_2}{R (L_2 + L'_2)} = \frac{Y_1 L'_2}{L_2 + L'_2} \\ Y_3 &= \frac{X_2 L'_2 L'_3}{R (L_3 + L'_3)} = \frac{Y_2 L'_3}{L_3 + L'_3} \\ Y_4 &= \frac{X_3 L'_3}{L_4 + R} = \frac{Y_3 R}{L_4 + R}. \end{aligned}$$

On voit, sous cette dernière forme, que Y va en diminuant, puisque chacune des valeurs particulières de cette quantité est égale à la précédente, multipliée par une quantité évidemment plus petite que l'unité.

Pour que la ligne fonctionnât bien, il faudrait que les valeurs de Y , c'est-à-dire que les courants qui traversent les divers appareils ne différassent pas trop les uns des autres. Si l'on voulait qu'ils fussent égaux, il faudrait rendre variables les résistances dans chaque appareil, en y ajoutant des bobines de résistance.

Les valeurs de X et Y trouvées en premier lieu nous font

voir que pour que Y_4 et Y_3 fussent égaux, il faudrait que Y_4 et Y_3 le fussent, et par conséquent on aurait l'équation

$$\frac{X_3 L'_3}{L_4 + R_4} = \frac{X_3 L'_3}{R_3}$$

d'où

$$R_3 = L_4 + R_4.$$

Pour que Y_3 et Y_2 fussent égaux, il faudrait que

$$\frac{X_3 L'_3}{R_3} = \frac{X_2 L'_2}{R_2};$$

et comme

$$X_3 = \frac{X_2 L'_2}{L_3 + L'_3},$$

on aurait :

$$\frac{X_2 L'_2 L'_3}{R_2 (L'_3 + L'_2)} = \frac{X_2 L'_2}{R_2};$$

d'où

$$R_2 = \frac{R_3 (L_3 + L'_3)}{L'_3} = R_3 \left(1 + \frac{L_3}{L'_3} \right).$$

Pour que Y_2 et Y_1 fussent égaux, il faudrait que

$$\frac{X_2 L'_2}{R_2} = \frac{X_1 L'_1}{R_1}$$

et comme

$$X_2 = \frac{X_1 L'_1}{L_2 + L'_2},$$

on aurait

$$\frac{X_1 L'_1 L'_2}{R_2 (L_2 + L'_2)} = \frac{X_1 L'_1}{R_1}$$

d'où

$$R_1 = \frac{R_2 (L_2 + L'_2)}{L'_2} = R_2 \left(1 + \frac{L_2}{L'_2} \right)$$

Soit R la résistance R_4 de la dernière station, on aura donc

$$R_4 = R \text{ et } R_3 = L_4 + R$$

$$R_2 = R_3 \left(1 + \frac{L_3}{L'_3} \right)$$

$$\text{Mais } L_3 = \frac{(R_4 + L_4) R_3}{L_4 + R_4 + R_3} = \frac{1}{2} (R + L_2)$$

$$\text{donc } R_2 = R + L_4 + 2 L_3.$$

On a trouvé également que

$$R_1 = R_2 \left(1 + \frac{L_2}{L'_2} \right)$$

$$\text{mais } L'_2 = \frac{(L_3 + L'_3) R_2}{L_3 + L'_3 + R_2}$$

$$\text{d'où } L'_2 = \frac{(L_3 + \frac{1}{2} (R + L_4)) (R + L_4 + 2 L_3)}{L'_3 + \frac{1}{2} (R + L_4) + R + L_4 + 2 L_3} = \frac{4}{3} (R + L_4 + 2 L_3)$$

$$\text{donc } R_1 = \frac{(R + L_4 + 2 L_3) (L_2 + \frac{4}{3} (R + L_4 + 2 L_3))}{\frac{4}{3} (R + L_4 + 2 L_3)}$$

$$\text{et enfin } R_1 = R + L_4 + 2 L_3 + 3 L_2.$$

La loi devient ainsi évidente, et s'il y avait un nombre n de postes, celui qui occuperait le rang m devrait encore une résistance R_{n-m} donnée par la formule

$$R^{n-m} = R + L_n + 2 L_{n-1} + 3 L_{n-2} + \dots + (m-1) L_{m-2},$$

et l'on voit que les bobines de résistance que l'on doit ajouter successivement auront pour valeur :

0 pour le dernier appareil ;

L pour le précédent ;

$L_n + 2 L_{n-1}$ pour l'antépénultième ;

$L_n + 2 L_{n-1} + 3 L_{n-2}$ pour celui qui précède, et ainsi de suite.

Supposons, pour exemple, que les distances entre les stations

soient de 100 kilomètres, et la résistance des appareils de 200 kilomètres; les bobines de résistance seront donc :

100 kilomètres pour la 3^e;
 300 kilomètres pour la 2^e;
 Et 600 kilomètres pour la 1^{re}.

La résistance totale du circuit sera donc :

300 kilomètres.

En négligeant la résistance de la pile, on aura pour l'intensité I du courant fourni par la pile :

$$I = \frac{F}{300}$$

et pour chacun des appareils, elle sera :

$$Y = \frac{F}{1200}$$

Ainsi, chaque appareil recevra un courant égal à celui que donnerait la pile placée à l'extrémité d'une ligne de 1,200 kilomètres.

L'égalité absolue n'est pas nécessaire, les appareils marchant bien avec des courants d'intensité divers. Supposons que, dans l'exemple précédent, il n'y ait pas de rhéostat : nous avons trouvé pour les courants de chaque part :

$$Y_1 = \frac{X L'_1}{R_1}$$

$$Y_2 = \frac{Y_1 L_2}{L_2 + L'_2}$$

$$Y_3 = \frac{Y_2 L'_3}{L_3 + L'_3}$$

$$Y_4 = \frac{Y_3 R}{L_4 + R}$$

$$L'_4 = R_4$$

$$L'_3 = \frac{(R_4 + L_4) R_3}{L_4 + R_4 + R_3}$$

$$L'_2 = \frac{(L_3 + L'_3) R_2}{L_3 + L'_3 + R_2}$$

$$L'^t = \frac{(L_2 + L'_2) R_1}{L_2 + L'_2 + R_1}$$

R_1, R_2, R_3, R_4 , sont égaux à 200 kilomètres, et L_1, L_2, L_3, L_4 , à 100 kilomètres ; on aura donc :

$$L'_4 = 200 \text{ km}$$

$$L'_3 = 120 \text{ km}$$

$$L'_2 = \frac{2200}{21} \text{ km}$$

$$L'_1 = \frac{8600}{85} \text{ km}$$

Ce qui donnera pour les valeurs de Y :

$$Y_1 = X \cdot \frac{8600}{85 \cdot 200} \text{ environ } \frac{X}{2}$$

$$Y_2 = \frac{X}{2} \cdot \frac{86}{85} \cdot \frac{22}{43}$$

$$Y_3 = \frac{X}{2} \cdot \frac{86}{85} \cdot \frac{22}{43} \cdot \frac{12}{22}$$

$$Y_4 = \frac{X}{2} \cdot \frac{86}{85} \cdot \frac{22}{43} \cdot \frac{12}{22} \cdot \frac{2}{3}.$$

Ges nombres suffisent pour indiquer combien le courant varie quand on n'ajoute pas de courant aux divers appareils, et que les derniers appareils ne devront plus fonctionner avec une régularité suffisante.

On s'est beaucoup occupé, il y a déjà quelque temps, de la transmission dans les deux sens, au moyen d'un fil unique. On parlait de courants en sens contraire, passant simultanément dans un même fil. Ces transmissions se réduisent en définitive à des distributions variables de courants résultant de la loi des courants dérivés. Supposons qu'un conducteur réunisse deux stations et que l'on veuille pouvoir en même temps transmettre et recevoir. Il est évident que le récepteur devra se trouver intercalé entre le manipulateur et la ligne, puisque, quelle que soit la position du manipulateur, il doit recevoir le courant du correspondant. Le fil venant de la ligne est donc relié au récepteur, et ce dernier au massif du manipulateur. Il peut se présenter, dans ce mode de transmission, quatre cas, soient A et B les deux correspondants :

- 1° A transmet à B ;
- 2° B transmet à A ;
- 3° A transmet à A et B à A ;
- 4° Ni A ni B ne transmettent.

Dans le premier cas, le récepteur B doit seul recevoir.

Dans le deuxième cas, le récepteur A doit seul recevoir.

Dans le troisième cas, les deux récepteurs reçoivent en même temps.

Dans le quatrième cas, aucun ne doit recevoir.

Les choses étant disposées comme il a été dit plus haut, dans le premier cas, le récepteur de A, aussi bien que celui de B, est traversé par le courant de A : pour empêcher le récepteur A de fonctionner, il faudra donc faire agir sur le récepteur A un courant de pile locale qui détruise l'effet du courant de ligne. Il

faudra pour cela que l'électro-aimant soit enveloppé de deux couches de fil dont l'une sera traversée par le courant de ligne et l'autre par le courant de pile locale, quand le manipulateur de A fonctionnera, et que ces deux courants aient leurs actions égales et de sens contraires. L'égalité dépend de la pile et de la disposition du conducteur ; ce sont ces deux éléments qui doivent servir à établir l'égalité entre les deux effets produits par les courants. Quant au sens, on en dispose par la manière dont on relie le fil à la pile ; selon qu'un de ses bouts ou l'autre sera attaché à l'un des pôles, le courant changera de sens. Supposons que nous ayons disposé le fil qui doit recevoir le courant de la pile locale et la pile locale elle-même, de manière que ce courant ait une action égale et de sens contraire à celle du courant envoyé sur la ligne. Il est évident que le même manipulateur doit en même temps envoyer ces deux courants ; il suffira, pour arriver à ce résultat, de mettre à côté l'un de l'autre deux manipulateurs que le même mouvement de la main fera fonctionner. Le mode de liaison de ces deux manipulateurs, facile du reste à imaginer, dépend de la forme qu'aura cet appareil, laquelle est elle-même le résultat du système employé. Ce manipulateur double aura donc deux boutons de pile que, pour continuer la notation adoptée précédemment, nous désignerons par les lettres P_m et Q_m , P_m pour la pile de ligne et Q_m pour la pile locale. Cet appareil devra également avoir deux boutons de ligne, l'un L_m pour la ligne, l'autre F_m pour le second fil du récepteur. Cette disposition étant adoptée pour les deux correspondants, suffira pour permettre la transmission entre eux pour tous les cas, les manipulateurs envoyant à la fois les courants des deux piles quand ils sont sur la position de transmission, et cessant d'envoyer ces courants quand ils sont sur la position de réception.

Soient en effet α_p et ϵ_p les actions des courants des stations

A et B sur leurs propres récepteurs, α_p et ϵ_p , celles qu'ils exercent sur les récepteurs de leurs correspondants. Enfin α_q et ϵ_q celles des courants de piles locales sur leurs récepteurs respectifs. On a disposé les piles des récepteurs et les piles locales, de manière que les actions magnétiques des courants locaux et des courants de ligne sur les appareils de leur station soient égaux, mais de signe contraire; on aura donc :

$$\begin{aligned}\alpha_q - \alpha_p &= 0 \\ \epsilon_q - \epsilon_p &= 0.\end{aligned}$$

Quand A transmet à B, alors les seules piles en activité sont celles de A, pile de ligne et pile locale; le récepteur de la station A reçoit de la première une action α_p et de la deuxième une action contraire α_q ; l'action totale sera donc $\alpha_q - \alpha_p$, différence que nous avons supposée être nulle; donc le récepteur A ne fonctionne pas. Quant au récepteur B, il ne reçoit que le courant de la pile de ligne de A, dont l'action sur lui est représentée par α'_p ; il fonctionne donc avec une action magnétique représentée par cette quantité α'_p .

De même, quand B transmet à A, on voit que le récepteur de B reçoit une action magnétique $\epsilon_q - \epsilon_p$ qui est nulle, et que le récepteur de A reçoit une action magnétique représentée par ϵ'_p .

Si A et B transmettent en même temps, il n'arrive plus dans les stations A et B que la différence des courants de ligne de A et de B, diminués des pertes sur la ligne. L'action magnétique de ces différences sur A et B est évidemment représentée par

$$\begin{aligned}\epsilon_p - \alpha_p \\ \text{et } \alpha'_p - \epsilon_p\end{aligned}$$

les actions magnétiques étant proportionnelles aux courants; mais

en même temps ces récepteurs reçoivent les actions magnétiques α_q et ϵ_q des courants des piles locales, actions contraires à α_p et ϵ_p ; on aura donc pour action définitive des divers courants qui agissent sur les récepteurs A et B :

$$\alpha_q + \epsilon_p = \alpha_p \text{ pour le récepteur A,}$$

$$\epsilon_q + \alpha_p = \epsilon_p \text{ pour le récepteur B;}$$

Or, par hypothèse, $\alpha_q - \alpha_p = 0$ et $\epsilon_q - \epsilon_p = 0$. Il ne reste donc que

ϵ_p pour action magnétique sur le récepteur A,
et α_p' pour action magnétique sur le récepteur B.

Enfin, quand ni A ni B ne transmettent, aucune pile n'est en activité, et par conséquent aucun récepteur ne fonctionne; on a donc le tableau suivant :

INDICATION DES TRANSMISSIONS.	ACTION MAGNÉTIQUE sur A.	ACTION MAGNÉTIQUE sur B.
A transmet à B.	$\alpha_q - \alpha_p = 0$	α_p'
B transmet à A.	ϵ_p	$\epsilon_q - \epsilon_p = 0$
A' et B se transmettent réciproquement.	ϵ_p	ϵ_p'
A et B ne transmettent pas.	0	0

On voit donc que par la seule disposition indiquée, le problème est résolu, pourvu que

$$\alpha_q - \alpha_p = 0,$$

$$\epsilon_q - \epsilon_p = 0,$$

et que les appareils ne fonctionnent que sous une action magné-

tique unique, ϵ_p pour la station A, et α_p pour la station B, ce qui du reste est indispensable.

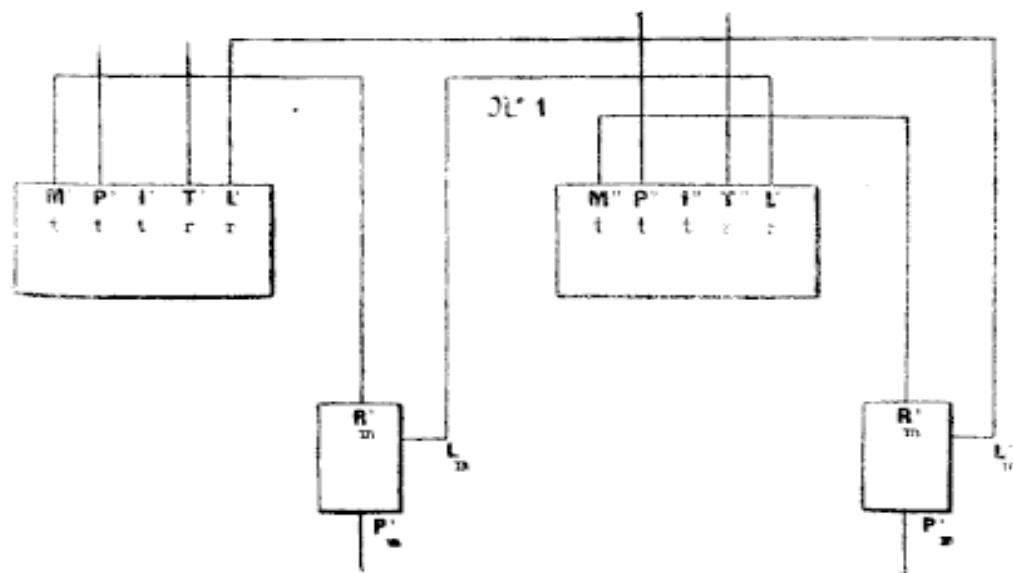
La difficulté résulte donc uniquement dans l'égalité au moins approchée qui doit exister entre les actions magnétiques des courants locaux et des courants de ligne sur les récepteurs de la station qui les envoie. Le courant de ligne ne dépend pas de la volonté de celui qui transmet ; l'égalité précédente ne peut donc être établie qu'en faisant varier l'action de la pile locale. Cette action ne peut varier par la disposition du conducteur, laquelle doit évidemment être invariable ; il faut donc que ce soit par l'intensité du courant lui-même. L'intensité du courant est proportionnelle au nombre des éléments et en raison inverse de la résistance à vaincre ; la première quantité ne varie pas d'une manière continue ; la seconde seule, au moyen de l'instrument que nous avons décrit sous le nom de rhéostat, peut varier d'une manière continue et établir l'égalité précédente, néanmoins cet instrument ne peut être proposé dans le service habituel. Heureusement que l'égalité que nous considérons n'a pas besoin d'être absolue, et que dans le cas où elle n'aurait pas exactement lieu, on pourrait contre-balancer l'action du résidu de la différence par l'augmentation ou la diminution de la force antagoniste à l'action magnétique, selon que la différence aurait lieu dans le sens de l'action du courant du correspondant ou bien en sens inverse.

On a proposé d'autres dispositions dont le principe est le même que celui d'où nous sommes parti. Nous avons choisi la précédente, qui nous a paru la plus compréhensible et en même temps la plus pratique. Dans la plupart des cas, il est parfaitement inutile de compliquer la transmission avec les dispositions précédentes, car le nombre de fils dont d'autres considérations déterminent la pose sur les lignes, est presque toujours plus que suf-

uisant pour les besoins du service. D'ailleurs le principe que nous avons posé suppose que le courant envoyé par le manipulateur A ne varie pas fréquemment d'intensité, au moins d'une manière notable ; mais dans les lignes sous-marines ou dans de longues lignes, le courant varie pendant tout le temps de sa propagation et de son extinction, au point même de changer de sens dans ce dernier cas, par suite du courant de retour. On voit donc que dans beaucoup de circonstances, notamment pour les lignes sous-marines, où cependant cette disposition aurait le plus d'utilité, elle ne pourrait être employée avec succès. Néanmoins, dans des cas spéciaux où le nombre des fils serait un grave inconvénient et où le phénomène de la propagation serait insensible, il y aurait peut-être lieu d'utiliser ce mode de transmission.

Quand on transmet d'une station à une autre, on ne sait pas, avec les dispositions habituelles, si les signaux transmis ont été correctement reçus par l'appareil correspondant ; ce contrôle peut s'établir automatiquement au moyen de deux fils par la translation.

FIGURE 29.



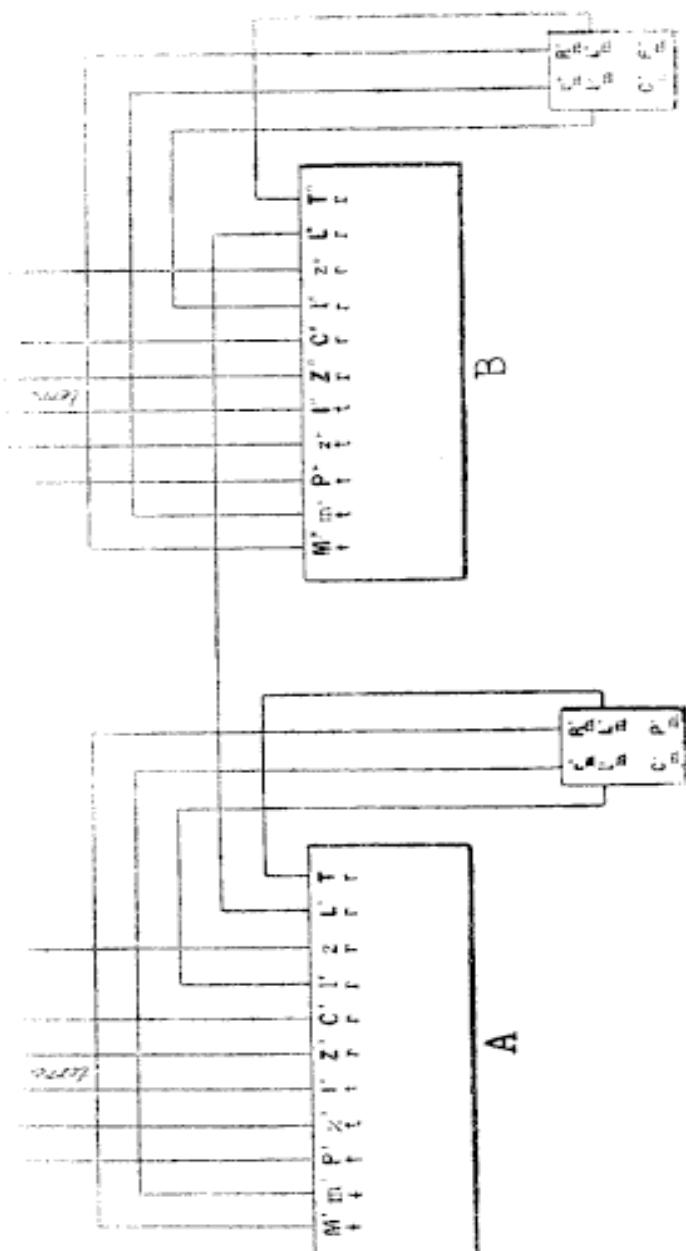
Soient A et B les deux stations correspondantes; elles ont deux fils de transmission, n° 1 et n° 2. L'un des fils, le n° 1, par exemple, servira pour les transmissions de A à B, et l'autre, le n° 2, servira pour les transmissions de B à A. Il faut que quand A envoie un courant à B, que B reçoive ce courant dans son récepteur et en envoie un autre à A, qui le recevra également dans son récepteur, sans que ce récepteur envoie de courant à B, sans quoi le mouvement se transmettrait indéfiniment d'un appareil à l'autre. De même, quand B transmet à A, le récepteur de ce dernier doit, comme pour la translation, envoyer un courant à B, sans que le récepteur de ce dernier renvoie de courant à A. Il faut donc que la translation de A pour B n'ait lieu que quand A reçoit, et que celle de B pour A ne se fasse que lorsque c'est B qui reçoit; la translation dans un quelconque des deux postes ne devra donc se faire que quand le manipulateur sera au repos, c'est-à-dire à l'état de réception. Comme deux fils servent pour la transmission, il en résulte que les courants y sont toujours transmis dans le même sens, et que chaque récepteur peut être attaché directement à la ligne sans l'intermédiaire du manipulateur. Le bouton de réception R_m de cet appareil pourra donc nous servir pour établir la translation et l'enlever en temps opportun. Pour la translation, le fil de ligne doit être attaché au bouton du massif M; au lieu de l'attacher directement, nous ne le ferons que par l'intermédiaire du manipulateur; la figure indique le mode d'attache des fils. On voit que quand A transmet, sa pile est en relation avec le fil de ligne n° 1; son courant traverse le récepteur de B, le fait fonctionner; la pile est alors mise par un de ses pôles en contact métallique avec le bouton du massif M''_m de l'appareil de B, et par suite, comme son manipulateur est en repos avec le fil de ligne n° 2 par l'intermédiaire des boutons R''_m , L''_m , le courant étant envoyé dans le fil n° 2, il fait fonctionner le récepteur A, qui alors indique les signaux reçus

par B; mais comme le manipulateur est à l'état de transmission, la pile, bien qu'en contact par son pôle avec le massif M'_t , est isolée du fil n° 1, le bouton R'_m du manipulateur A n'étant pas en relation métallique avec la borne L'_m de cet appareil.

Il est clair qu'au moyen de la disposition que nous avons décrite pour la transmission dans les deux sens par un seul fil, il serait facile de faire le contrôle automatique dans les mêmes conditions. Si A et B sont les deux postes correspondants, quand A envoie son courant à B, il faut que B envoie son courant à A, et cela par translation. En supposant que les deux appareils soient à relais, il faudra que la partie de l'appareil qui établit la translation soit double, comme nous avons vu que devait l'être le manipulateur dans les transmissions par un seul fil. Cette pièce du récepteur fait, en effet, dans ce cas, fonction de manipulateur, et doit, par conséquent, être analogue à ce dernier. De là résulte que tous les boutons des appareils ordinaires devront être doublés; nous désignerons donc ces seconds boutons par les mêmes lettres que les premiers, seulement en minuscules, au lieu d'être en majuscules. Toutefois, comme dans le circuit des piles locales il n'y a pas de terre, mais que les communications ont lieu avec le pôle zinc, nous remplacerons la lettre t par la lettre z , de même nous remplacerons la lettre p par la lettre c . La figure ci-après indique alors la disposition des fils. (Voir page 122, la figure 30.)

En commençant par les manipulateurs, les boutons P_m sont en communication avec les piles de ligne des deux postes, les boutons C_m avec les pôles cuivre des piles locales des relais, les boutons L_m avec les boutons de terre du récepteur, les boutons t_m avec les boutons t_r du relais, boutons qui sont chacun l'extrême-mité des seconds fils dans lesquels on fait passer le courant des

FIGURE 30.



piles locales qui doivent annuler les actions des courants envoyés sur la ligne. Les boutons R_m et r_m sont reliés aux boutons M_t et m_t , qui communiquent avec les massifs de la translation.

Quant aux récepteurs, il ne reste plus que les boutons P_t , Z_t et z_r qui communiquent, les uns, P , avec les pôles cuivre des piles de la ligne, et les autres, Z_t et z_r , avec les pôles zincs des piles locales des relais, puis le bouton I_t , que l'on relie à la terre, les boutons Z_r et C_r , que l'on relie aux deux pôles des piles locales des récepteurs ; enfin, les boutons L_r , qui sont reliés aux fils de ligne.

Voici comment fonctionne l'appareil : supposons que A presse sur son manipulateur, alors les circuits de la pile de ligne et de la pile du relais sont formés, le premier, par la communication métallique des boutons L'_m et P'_m du manipulateur, le fil du relais entre les boutons L'_r et T'_r , puis par le fil de ligne, l'appareil du poste B et la terre. Le circuit de la pile locale du relais se trouve en même temps fermé par la communication métallique des boutons c'_m et t'_m du manipulateur, les deux fils du relai entre les boutons t'_r et z'_r du relai, et la pile qui communique par un pôle zinc avec z'_r et par son pôle cuivre avec c'_m . Les deux fils du relais de A étant traversés, l'un, par le courant de la pile de ligne, l'autre, par celui de la pile locale du relais qui s'annulent, cet appareil ne fonctionne pas ; mais le courant envoyé sur la ligne arrivé en B, entre par le bouton L''_r du récepteur, traverse l'un des fils du relais, en sort par le bouton T''_r , entre par le bouton L''_m du manipulateur, en sort par le bouton R''_m , qui, au repos, est relié métalliquement avec L''_m , passe ensuite par le bouton M''_t dans le premier massif du récepteur, et en sort par le bouton isolé I pour se rendre à la terre. Le relais n'ayant qu'un seul de ses fils traversé par le courant, fonctionne et ferme, comme à l'ordinaire, le circuit de la pile locale du récepteur, qui à son tour fonctionne ; mais en fonctionnant, ce dernier appareil rompt la communication métallique du bouton M''_t avec le bouton L''_t , pour l'établir avec P''_t (cela doit se faire sans intervalle de temps

sensible). Le courant de la pile de ligne de B est donc envoyé sur la ligne, en passant par le bouton M''_t du récepteur, R''_m du manipulateur, L''_m du même appareil, par le premier fil du relais entre les boutons T''_r et L''_r , enfin, par le fil de ligne. Il agit en sens contraire du courant de A, et par conséquent, il aurait pour résultat de faire cesser la marche de B, si, en même temps qu'il se trouve établi, le second massif m''_t et le bouton z''_t du récepteur n'étaient reliés métalliquement. Cette disposition ferme le circuit de la pile locale du relais de B, dont le courant passe alors dans le deuxième fil du relais et annule l'effet du courant envoyé par B sur la ligne; l'appareil de B continue donc de fonctionner par le courant envoyé par A. Le courant envoyé par B annulant à peu près le courant envoyé par A, il en résulte que, dans le poste A, le premier fil du relais n'est plus traversé que par un courant à peu près nul, et, par conséquent, le courant de la pile locale qui passe dans le second fil n'étant plus contre-balancé par le courant envoyé par A sur la ligne, fera marcher le relais et par suite le récepteur. Quant à ce dernier, il ne pourra pas fermer les circuits des piles locales et de ligne, ces circuits devant être complétés par le manipulateur entre les boutons l'_m et r'_m d'une part, L'_m et R'_m de l'autre. Il résulte de là que quand A envoie son courant à B, l'appareil de ce poste en fonctionnant enverra le courant de sa pile de ligne à A, qui fonctionnera à son tour. On verra de même que quand A cessera d'envoyer son courant à B, ce poste cessera d'envoyer son courant à A, et tout rentrera dans le repos. Il faut toutefois remarquer que le manipulateur de A doit mettre suffisamment de temps entre la position d'envoi du courant et celle de réception, pour que l'appareil B cessant de fonctionner, l'appareil A ait eu le temps de revenir à la position de repos.

Les deux appareils étant symétriques l'un par rapport à l'autre.

il est clair que tout ce que nous avons dit pour l'envoi du courant de A à B aurait lieu également pour l'envoi du courant de B à A.

Pour compléter l'étude des transmissions télégraphiques, il nous reste à parler des méthodes diverses employées pour prévenir les employés qu'une dépêche va être transmise. Lorsque la communication ordinaire se trouve établie entre deux postes, on n'a pas ordinairement besoin, pendant le jour, d'un appareil spécial pour prévenir de l'arrivée d'une dépêche, puisque les employés ne doivent pas le plus habituellement quitter le bureau télégraphique. Cependant, lorsqu'un employé doit desservir plusieurs appareils, ou lorsque la rareté des dépêches ne permet pas d'exiger une attention soutenue de la part de ces agents, il convient d'avoir un mode spécial d'avertissement et qui consiste à mettre en activité une sonnerie. Quelle que soit la forme employée pour la sonnerie, elle est toujours mise en mouvement par un courant qui peut être soit un courant de ligne, soit un courant local. Dans le premier cas, un commutateur permet d'enlever à volonté la communication des fils avec les appareils récepteurs pour les mettre en communication avec la sonnerie; il suffit le plus souvent d'ajouter au commutateur qui sert à établir les communications directes ou simultanées, une touche et un bouton dans lequel vient s'engager une des extrémités du fil de la sonnerie, l'autre étant en communication avec la terre. Dans les bureaux où ne se fait pas de service de nuit, la sonnerie se trouve habituellement dans la chambre à coucher du chef de service; les fils qui réunissent alors la sonnerie avec le commutateur, d'une part, et avec la terre, de l'autre, sont un peu plus longs, mais cela n'a aucun inconvénient.

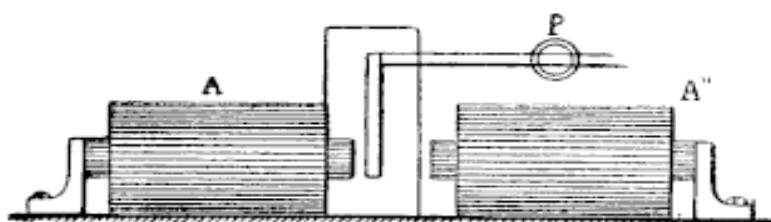
L'établissement de la sonnerie est aussi simple, quand on veut

la faire fonctionner par le courant d'une pile locale. Il suffit alors, soit de l'intercaler facultativement, au moyen d'un commutateur, dans l'un des deux fils qui réunissent les boutons C et Z des récepteurs aux pôles de la pile, soit de se servir, pour cet usage, des boutons destinés à la translation. Au moyen d'un commutateur, on établit la communication du massif du récepteur avec la sonnerie, au lieu de l'attacher à la ligne, en mettant l'autre extrémité du fil de la sonnerie en communication avec la terre. Si l'on veut qu'une sonnerie fonctionne par toutes les lignes qui entrent dans le bureau, il faut, ou mettre une sonnerie en communication par chaque appareil, ou établir une des extrémités du fil de la sonnerie en communication avec tous les appareils du poste; celui de ces appareils qui est mis en mouvement ferme le circuit de la pile locale de la sonnerie. Dans ce dernier cas, à moins que le mouvement du récepteur ne reste marqué, l'employé peut ne pas connaître quelle est la ligne par laquelle il est appelé. Pour obvier à cet inconvénient, on a, dans quelques chemins de fer, établi autant de relais spéciaux pour la sonnerie qu'il y a de lignes. En même temps que celui des relais qui reçoit le courant de sa ligne ferme le circuit de la pile locale de la sonnerie, il dégage un indicateur qui, par sa position, indique quel est celui des relais qui a fonctionné. Quand plusieurs sonneries existent dans un poste, si les relais dont il vient d'être parlé n'existent pas, il est de toute nécessité que les sonneries elles-mêmes portent des indicateurs qui puissent faire connaître quelle est celle des sonneries qui a fonctionné.

Lorsqu'une ligne comprend des postes télégraphiques d'importance diverse, on met souvent pendant le jour, en communication par translation, les postes les plus importants, et on appelle les postes intermédiaires en donnant toutes les lettres du

nom du poste rappelé, lettres que le bruit seul suffit pour faire connaître, rien que par l'ouïe, aux employés un peu exercés ; il est évident que ce moyen ne peut servir pendant la nuit. Dans les chemins de fer, la communication directe ou par translation ne s'établit pas sur des fils omnibus, c'est-à-dire sur ceux qui desservent les petites stations aussi ; pour qu'un poste puisse transmettre une dépêche à un autre poste, il faut qu'il appelle successivement tous les intermédiaires pour leur demander communication directe. Il arrive souvent qu'une fois sur la communication directe, les postes intermédiaires y restent pendant toute la nuit, et l'on ne peut plus rien leur transmettre. Pour obvier à cet inconvénient, plusieurs moyens ont été proposés ; tous ces moyens employaient le courant inverse du courant habituel, ce qui rendait la question peu pratique sur les lignes aériennes, et tout à fait impraticable pour les lignes sous-marines ou souterraines, où l'isolement du fil est altéré par l'envoi de courants d'électricité négative. M. Bréguet se servait, pour rappeler un ou plusieurs postes intermédiaires placés entre deux stations mises en communication directe, d'un appareil composé de deux électro-aimants A' , A'' intercalés dans la ligne à chaque station

FIGURE 31.

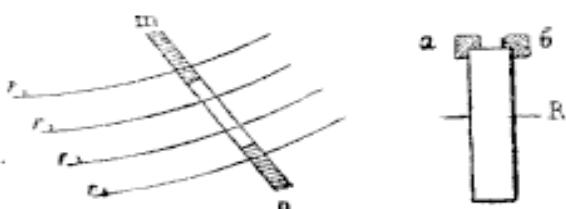


intermédiaire. Une armature en acier aimanté est mobile entre les deux pôles des deux électro-aimants ; un contre-poids P maintient l'armature plus rapprochée de l'aimant A' , quand aucun

courant ne passe; si le courant passe dans le sens ordinaire du travail, l'aimantation concourt avec le poids P à maintenir l'armature dans cette position; mais quand le courant passe en sens contraire, l'aimant A' repousse l'armature qui, au contraire, est attirée par A'' , et ces deux forces concourent à rapprocher l'armature de A' , malgré le contre-poids. La course de l'armature est limitée par deux vis, dont l'une, celle qui se trouve du côté de A' , est en communication avec l'un des deux pôles de la pile; l'autre pôle étant fixé à l'axe de l'armature, il en résulte que si, dans ce circuit, on intercale une sonnerie, elle se mettra en mouvement chaque fois que le courant passera en sens inverse des transmissions habituelles, l'armature se rapprochera de l'aimant A'' . Cette solution, outre l'inconvénient que présente l'emploi d'une armature aimantée, ne remplit pas toutes les conditions du problème, qui sont d'appeler à volonté l'une quelconque des stations intermédiaires, car l'appareil de M. Bréguet appelle nécessairement toutes les stations situées entre les extrêmes.

M. Ailhaud, inspecteur des lignes télégraphiques, s'inspirant d'un procédé proposé par M. Guez, que nous décrirons plus loin, a obvié à cet inconvénient.

FIGURE 32



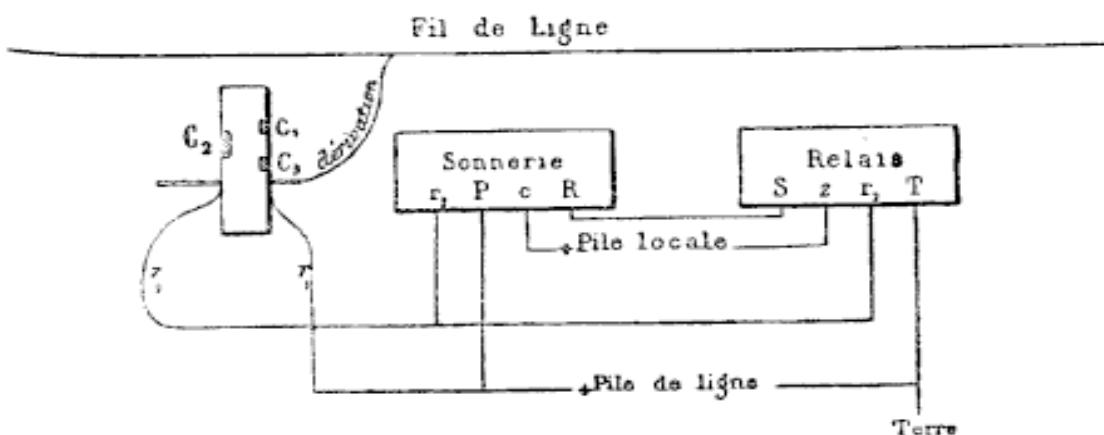
Les ressorts r_1 , r_2 , r_3 , r_4 viennent buter contre une tige métallique m n , dont le milieu est en ivoire, de sorte que dans la

position normale, les ressorts r_1 et r_4 appuyés sur la partie métallique communiquent entre eux, et les deux autres, appuyant sur de l'ivoire, sont isolés. Une roue, en matière isolante, fixée à l'axe de l'aiguille des minutes de l'horloge, porte à son pourtour deux petits appendices en platine α et ϵ qui, pendant cinq minutes, à chaque tour complet de la roue, c'est-à-dire à chaque heure, soulèvent, en les faisant communiquer métalliquement, l'un α , les ressorts r_1 , r_2 , et l'autre ϵ , les ressorts r_3 , r_4 . De cette manière, pendant cinq minutes par heure, les ressorts r_1 , r_4 cessent de communiquer entre eux, et au contraire r_1 et r_2 communiquent métalliquement, ainsi que r_3 et r_4 . Si donc un appareil semblable est installé dans chaque station intermédiaire, que les ressorts r_1 et r_4 soient reliés aux deux lignes qui y aboutissent, et que r_2 et r_3 soient reliés aux boutons d'entrée et de sortie du communicateur de M. Bréguet, on voit que pendant cinq minutes par heure chaque station aura son communicateur intercalé dans la ligne, et que pendant ce temps cette station pourra être appelée si son appareil est traversé par un courant de sens convenable. Les communications ordinaires n'agissent pas, du reste, sur les appareils des stations qui s'intercalent ainsi alternativement dans le circuit, à cause du sens du courant. Elles ne sont d'ailleurs influencées que d'une manière insensible par l'introduction des fils des communicateurs, qui ne doivent offrir que peu de résistance au courant. On a choisi 5' pour la durée de l'introduction de l'appareil, à cause des variations qui peuvent exister dans la marche des divers pendules.

M. Guez, directeur de station télégraphique en France, à qui est due l'idée d'employer la pendule dont est pourvue chaque station pour la rendre susceptible d'être périodiquement appelée, a donné une solution du problème qui, modifiée par la

commission de perfectionnement instituée à l'administration centrale, est la plus pratique de toutes celles proposées jusqu'ici. Supposons que la pendule de la station à rappeler établisse à chaque heure pendant une minute les communications suivantes ; pendant les quinze premières secondes et les quinze dernières communications, par une dérivation du fil de ligne avec la pile de ligne, et pendant les trente secondes intermédiaires, communication de la même manière du fil de ligne avec la terre par l'intermédiaire du fil d'un relais qui, une fois déplacé de sa position de repos par l'effet d'un courant, reste dans cette position après la cessation du courant qu'il interrompt de lui-même aussitôt qu'il a fonctionné. Ce relais, tout en rompant la communication du fil de ligne avec la terre, ferme le circuit d'une pile locale dans lequel se trouve intercalée une sonnerie qui, par son fonctionnement, établit et interrompt périodiquement la communication du fil de ligne avec la pile de ligne. On voit que le commencement et la fin de l'introduction de la sonnerie dans le circuit seront indiqués sur toute la ligne par un courant de 15" de durée, et que pendant les trente secondes intermédiaires, tout poste situé sur la ligne pourra faire marcher la sonnerie de ce poste par l'envoi d'un courant. Il sera en outre averti que la sonnerie aura bien fonctionné par la réception d'un courant intermittent. Les choses sont disposées comme l'indique la figure ci-contre. A est une roue en matière isolante montée sur l'axe des minutes ; elle porte à son pourtour trois pièces métalliques : c_1 c_3 d'un côté, c_2 de l'autre. Ces pièces sont en contact métallique avec l'axe de la roue, lequel communique lui-même métalliquement avec le fil de ligne au moyen d'une dérivation. Deux ressorts r_1 et r_2 sont à droite et à gauche de la roue, et les longueurs des pièces métalliques c_1 , c_2 , c_3 sont telles que le ressort r_1 se trouve par son frottement alternatif sur c_1 et c_3 en communication avec l'axe, par suite avec la dérivation de

FIGURE 33.



la ligne pendant les quinze premières et les quinze dernières secondes d'une minute. Pendant les trente secondes intermédiaires, c'est r_2 qui est en communication de la même manière avec ce fil, mais par l'intermédiaire de la pièce c_2 qui par suite est double des deux autres. Le ressort r_2 est relié avec le pôle positif de la pile de ligne; le courant est donc envoyé sur la ligne pendant les quinze premières et les quinze dernières secondes de la minute; ce qui annonce le commencement et la fin du temps pendant lequel la station peut être rappelée. Le relais à quatre boutons: l'un r_2 le joint au second ressort r_2 ; l'autre T le fait communiquer avec la terre; de sorte que à un moment quelconque des 30' intermédiaires, il peut recevoir le courant de ligne; toutefois la communication avec la ligne cesse par l'effet même du fonctionnement du relais. Des deux autres boutons, l'un S est attaché à la sonnerie; l'autre Z au pôle négatif de la pile locale. Quand le relais a fonctionné, il réunit métalliquement ces deux boutons, et cette liaison ne cesse que par l'intervention de l'employé appelé. La sonnerie a aussi quatre boutons; l'un c communique avec le pôle cuivre de la pile locale; l'autre R avec

le bouton S du relais ; ces deux boutons se relèvent par le fil de la sonnerie ; de sorte que dès que le relais fonctionne, la sonnerie est intercalée dans le circuit fermé de la pile locale, et fonctionne elle-même tant que l'employé appelé n'a pas remis le relais dans son état primitif. Des deux autres boutons l'un r_2 communique avec le ressort r_2 et par suite avec le fil de ligne pendant les trente secondes intermédiaires de la minute ; l'autre P se réunit au pôle positif de la pile de ligne ; ces deux boutons r_2 et P sont reliés métalliquement entre eux d'une manière intermittente par l'interrupteur qui fonctionne avec la sonnerie. On voit donc que dès que le relais aura fonctionné, il ne reliera plus le fil de ligne avec la terre ; mais la sonnerie fonctionnant, un courant intermittent sera envoyé sur la ligne jusqu'à ce que le ressort r_2 , quittant son contact, le ressort r_1 soit mis en communication avec la ligne, et qu'un courant continu de 15" y soit envoyé ; puis que les choses se rétablissent dans leur état ordinaire, à moins que l'employé averti ne se mette, au moyen de commutateurs, en relation avec ses correspondants.

Si les récepteurs sont des appareils Morse, la station qui appelle recevra les signaux suivants :

La premier trait dure 15", indique la disposition du poste pour l'avertissement ; les points indiquent que la sonnerie a fonctionné, et le dernier trait, que la faculté d'avertissement a cessé pour la station. Si l'employé averti est absent plus d'une heure, comme sa sonnerie ne cessera pas de fonctionner, le correspondant recevra donc de ce poste à chaque heure un courant intermittent, sans cependant qu'il ait appelé de nouveau cette station ; l'avertissement une fois donné se poursuit jusqu'à réponse de l'employé appelé.

§ II.

**NOTIONS ÉLÉMENTAIRES SUR LES ORGANES DES APPAREILS
EMPLOYÉS EN TÉLÉGRAPHIE.**

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que les appareils qui composent à proprement parler la machine télégraphique sont : le manipulateur, qui envoie le courant ; le récepteur, qui est mu par cet agent, et le relais, qui fait à la fois fonction de récepteur et de manipulateur. Quand le manipulateur n'est pas automatique, c'est un simple commutateur ou interrupteur, qui n'a que des formes particulières à chaque système d'appareil télégraphique ; quand, au contraire, le manipulateur est automatique, son mouvement est déterminé par un moteur qui est ordinairement un mouvement d'horlogerie. Nous devrons donc étudier ces espèces de mouvement.

Les récepteurs aussi ont habituellement un mouvement d'horlogerie qui a des fonctions différentes, selon l'espèce de récepteur que l'on considère ; mais, en outre, ces appareils sont munis le plus souvent d'appareils magnétiques mis en mouvement par les courants électriques ; ces appareils sont de plusieurs espèces : nous devrons donc les étudier, de même que les mouvements d'horlogerie. Quant aux relais, ils n'ont au plus que les parties que nous venons d'indiquer, c'est-à-dire des mouvements d'horlogerie et des appareils électro-magnétiques.

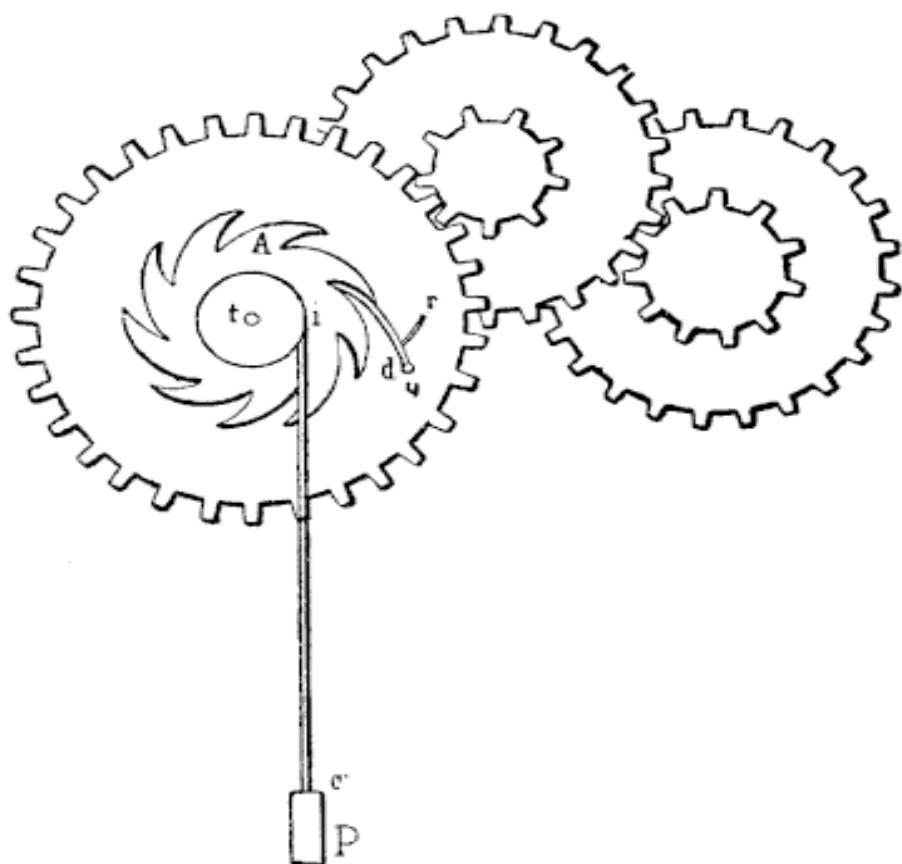
Enfin, les récepteurs donnent souvent des signaux imprimés ; nous devrons étudier les divers modes susceptibles d'être employés

pour l'écriture des signaux. C'est dans cette dernière catégorie que rentrera l'appareil électro-chimique. Nous commencerons par l'étude des mouvements d'horlogerie :

Dans tout mouvement d'horlogerie, on doit distinguer trois choses : le moteur, la transmission et le régulateur du mouvement. Le moteur est ordinairement un poids ou un ressort ; ce pourrait être l'électricité elle-même ; toutefois nous ne ferons pas, pour cette année au moins, l'étude de cette dernière espèce de moteurs qui ne sont pas jusqu'à présent employés d'une manière nouvelle en télégraphie

Quand le moteur est à poids, il se compose d'un cylindre autour duquel s'enroule une corde ou une chaîne accrochée par une de ses extrémités au cylindre ; à l'autre extrémité est le poids. Le cylindre a un axe en acier qui est terminé par deux tourillons lesquels tournent soit dans des trous, soient dans des coussinets dont nous donnerons plus loin la description. Le poids sollicité par la pesanteur entraîne la corde qui, elle-même, fait tourner le cylindre ; c'est ce mouvement de rotation qui, au moyen des organes de transmission, se transforme de manière à produire l'effet désiré. La figure (34) montre cette espèce de moteur. P est le poids, $c' c''$ la corde, A l'axe du cylindre, t l'un des tourillons. Par cette disposition, on voit que le mouvement cesserait quand la corde serait entièrement déroulée et qu'il faudrait faire tourner le cylindre en sens inverse pour l'enrouler de nouveau et recommencer le mouvement, ce qui serait un grave inconvénient. On pourrait détacher le poids et enrouler de nouveau la corde autour du cylindre, on éviterait ainsi de faire marcher tout l'appareil en sens inverse de son mouvement primitif. Un mécanisme fort simple permet de faire cet enroulement sans détacher le poids. Le cylindre ne transmet pas directement le

FIGURE 34.



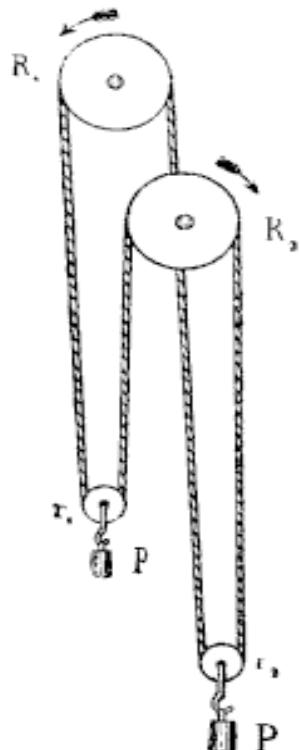
mouvement au reste de l'appareil; une roue est mobile autour de l'axe du cylindre, en sorte qu'on pourrait faire tourner ce dernier dans les deux sens, sans mettre cette roue en mouvement, si à l'axe et tout contre la roue mobile ne se trouvait fixée une roue de rochet, c'est-à-dire une roue échancrée sur tout son contour de dents analogues aux dents d'une scie. Ces dents sont inclinées dans le sens du mouvement que le poids imprime à l'axe; un doigt d , ayant à son extrémité la forme du creux des dents de la roue de rochet, entre dans ces dents, il est mobile autour d'un petit axe vissé dans la roue mobile v et est pressé contre les dents de la roue de rochet par un petit ressort r , éga-

lement fixé à la roue mobile. On voit qu'à cause de l'inclinaison des dents de la roue de rochet, l'axe ne peut être entraîné par le poids sans entraîner lui-même en même temps la roue mobile, car ce mouvement tend à faire entrer de plus en plus le doigt dans le creux de la dent. Mais si l'on fait tourner l'axe en sens contraire du mouvement que détermine le poids, ce qui enroule la corde en remontant le poids, le doigt sera soulevé en comprimant son ressort et ne sera pas entraîné, par conséquent la roue mobile ne sera pas non plus mise en mouvement. Si donc l'axe se termine par un prisme à base carrée, qu'on appelle *carré*, en tournant au moyen d'une clef à trou aussi carré cet axe en sens contraire du poids, on enroulera la corde et on remontera le poids sans faire tourner tout l'appareil en sens contraire du mouvement qu'il doit avoir. Au contraire, le poids, en entraînant le cylindre et l'axe, entraînera aussi la roue mobile et communiquera son mouvement à tout l'appareil.

Si, par cette disposition, on est bien arrivé à remonter le poids, et par suite à rendre l'appareil susceptible de marcher de nouveau sans lui imprimer un mouvement inverse, on a néanmoins un temps d'arrêt pendant qu'on remonte le mouvement. Ce temps d'arrêt n'a pas d'inconvénient dans beaucoup de cas; mais dans d'autres, cela pourrait être un grave inconvénient et devenir même presque un empêchement absolu, comme dans les horloges.

Une chaîne sans fin vient s'engrener dans les gorges dentées de deux poulies R_1 R_2 ; les deux parties qui pendent entre les poulies passent dans les gorges de deux autres petites poulies r_1 r_2 , dont les chapes supportent deux poids, l'un p plus petit que l'autre P . En même temps, la poulie R_1 est munie d'un encliquetage comme celui décrit précédemment, et qui ne lui permet de

FIGURE 35.

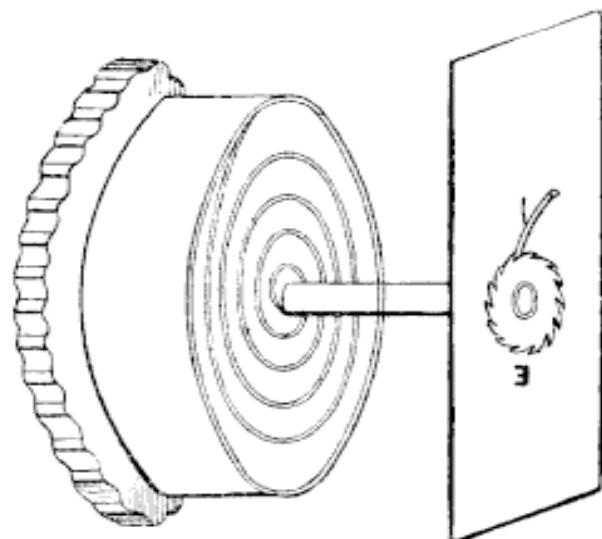


tourner que dans le sens de la flèche. Quand les choses seront laissées à elles-mêmes, le poids P , plus lourd que p , tendra à entraîner la chaîne en faisant tourner les deux poulies dans le sens de la flèche marquée à la poulie R_2 ; mais comme la poulie R_1 ne peut tourner dans ce sens, il en résulte que, d'une part, le poids p s'élèvera, d'autre part le poids P s'abaissera en faisant rouler la chaîne dans la gorge des poulies r_1 et r_2 et en entraînant la poulie R_2 dans le sens de la flèche. Pour remonter le poids P arrivé au bout de sa course, il suffira de faire tourner R_1 dans le sens de sa flèche pour reculer le poids P , sans que pour cela il cesse d'agir sur la poulie R_2 , qui continuera à tourner. Il est bien entendu que R_2 est la poulie motrice et que R_1 n'est que poulie de remontage. Toutes deux peuvent être montées sur le

même axe, à la condition que R_1 sera libre sur cet axe et que son encliquetage soit attaché à une partie fixe de l'appareil.

Au lieu de poids, on peut se servir comme moteur d'un ressort. Ce ressort se compose d'une lame d'acier, longue, mince et étroite, tournée en spirale sur elle-même, en l'enroulant autour d'un axe : si cet axe est fixe, le ressort ne sera plus maintenu, il se déroulera en faisant décrire à son extrémité libre un certain nombre de révolutions autour de l'axe. Si cette extrémité est attachée à une roue mobile autour de cet axe, elle entraînera cette roue en la faisant tourner elle-même ; c'est cette roue qui sert de moteur. Pour enrouler de nouveau le ressort autour de l'axe, il suffit de faire tourner cet axe en l'arrêtant après que l'enroulement a eu lieu ; un encliquetage E (fig. 36) analogue à ceux déjà décrits, remplit parfaitement ce

FIGURE 36.

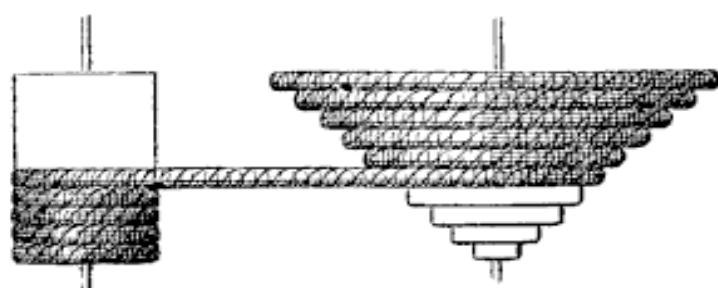


dernier objet, en permettant de s'arrêter à tout moment pendant le remontage. Il n'est pas besoin d'une disposition spéciale

comme précédemment pour que le mouvement de la roue motrice continue pendant le remontage qui agit dans le sens du mouvement lui-même. Ordinairement, à la roue se trouve adaptée une boîte circulaire qu'on n'a pas fermée dans la figure (36), afin d'y faire voir le ressort. Cette boîte porte le nom de *bârillet*.

Les moteurs à ressort n'ont pas la même force; à tous les moments de la distension du ressort, la force va en diminuant jusqu'à zéro, et par suite le mouvement va sans cesse en se ralentissant. Les régulateurs, dont nous parlerons plus loin, peuvent bien empêcher les variations du mouvement, mais à la condition qu'elles seront accidentielles ou de peu d'étendue; il faut donc, quand on veut avoir un mouvement très-régulier, ou ne pas se servir de ressorts, ou employer le procédé usité dans l'horlogerie. On ne se sert d'abord que d'une partie de la distension du ressort, ce qui limite la variation; ensuite le mouvement de la roue motrice sert à mettre en mouvement un axe, au moyen d'une corde ou d'une chaîne qui s'enroule sur un cylindre fixé à l'axe de la roue et formé du bârillet; elle se déroule de dessus un cône ayant pour axe celui qui doit être mis en mouvement (figure 37).

FIGURE 37.



Ce cône, pour qu'il n'y ait pas glissement, est creusé au moyen d'une gorge dont la directrice est une courbe tenant à la fois de l'hélice et de la spirale, c'est-à-dire que comme l'hélice, elle forme des anneaux séparés, mais ces anneaux vont en diminuant comme dans la spirale ; cette pièce s'appelle fusée. Quand une corde est fixée par une de ses extrémités à une poulie dans la gorge de laquelle elle passe, l'effort fait en tirant la corde a d'autant plus de puissance pour faire tourner la poulie que le rayon de cette dernière est plus considérable, et cet effet est proportionnel à ce rayon. Réciproquement l'effort qu'il faut faire pour tendre la gorge en faisant tourner la poulie est en raison inverse du rayon. De là résulte que le ressort qui tend à faire tourner le cylindre moteur exercera sur la corde une tension constante, si sa force de distension est constante et proportionnelle à cette dernière, si elle est variable. D'autre part, l'effort pour faire tourner la fusée au moyen de la corde va en diminuant, puisque le rayon de la poulie va en augmentant. On conçoit donc qu'on puisse établir une espèce d'équilibre entre la diminution de la force fournie par le ressort et la diminution de force nécessaire pour faire tourner la fusée, de manière à avoir un mouvement à peu près constant.

Nous n'étudierons pas, comme nous l'avons déjà annoncé, les moteurs électriques qui pourraient être employés peut-être avantageusement dans les appareils télégraphiques. Les seuls mouvements employés jusqu'ici sont les mouvements de va-et-vient de l'armature d'un électro-aimant, mouvement qui est seulement transformé en un autre mouvement de va-et-vient. Nous étudierons tout à l'heure ce mode de transformation. Quant à l'électro-aimant lui-même, nous l'étudierons dans la seconde partie de ce paragraphe.

Nous venons de voir que les mouvements de va-et-vient des élec-

tro-aimants se transformèrent en un autre mouvement de va-et-vient. Le mouvement de rotation obtenu par le développement du ressort se transforme dans les appareils télégraphiques en un autre mouvement de rotation ; ce sera la seconde transformation de mouvement que nous étudierons. On a quelquefois à transformer un mouvement de rotation continue en un mouvement alternatif, c'est-à-dire de va-et-vient, c'est ce que nous étudierons en troisième lieu. Enfin, pour compléter cette étude, nous dirons quelques mots d'un mode de transformation usité dans les télégraphes des cabinets de physique : c'est la transformation d'un mouvement alternatif en un mouvement de rotation continue. Nous avons vu précédemment comment le mouvement continu et rectiligne d'un poids était transformé en un mouvement continu de rotation.

Quand une tige droite est mobile autour d'un de ses points supposé fixe, elle porte le nom de levier. En appliquant en un point quelconque du levier une force suffisante, on peut vaincre une résistance appliquée, elle aussi, en un point quelconque du levier. La force qui doit vaincre la résistance porte le nom de puissance. La puissance peut se trouver soit de l'autre côté du point d'appui par rapport à la résistance, soit du côté opposé : dans ce dernier cas, elle peut se trouver ou entre le point d'appui et la résistance ou de l'autre côté de la résistance. On a ainsi les trois espèces de levier qu'indiquent les trois figures ci-après :

FIGURE 38.

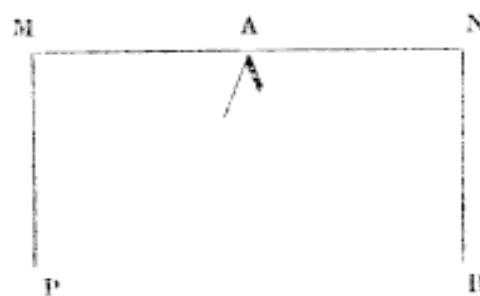


FIGURE 39.

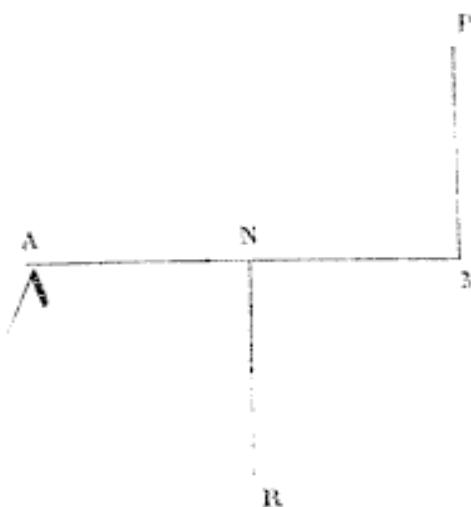
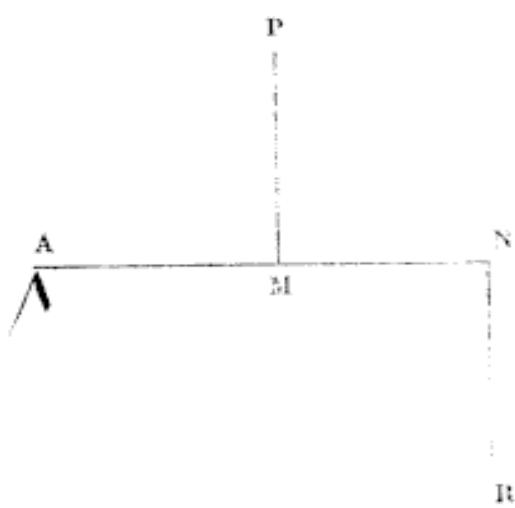


FIGURE 40.

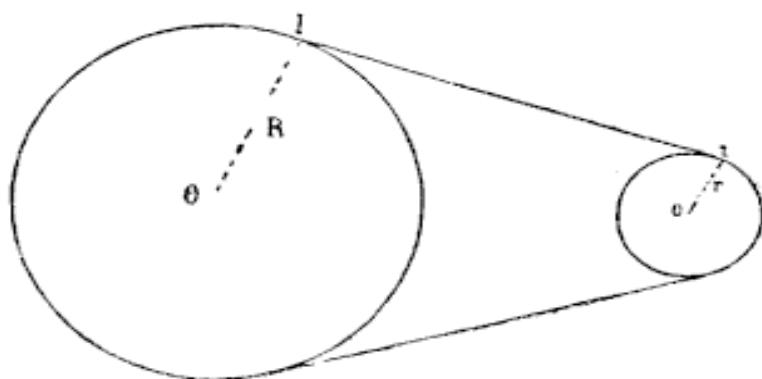


La distance de l'une quelconque de ces forces au point d'appui est son bras de levier ; le produit de la force par le bras de levier qui lui correspond est le moment d'inertie. Pour que la puissance puisse vaincre la résistance, il faut que son moment d'inertie soit plus grand que celui de cette dernière force. La charge que supporte le point d'appui est égale à la somme ou la différence de la puissance et de la résistance, selon que ces deux forces agissent dans le même sens ou en sens contraire. L'espace parcouru par l'extrémité d'un bras de levier par un même mouvement de rotation angulaire est proportionnel à son bras de levier. De là résulte que pour agrandir un mouvement de va-et-vient, il faut augmenter le bras de levier de la résistance ; mais alors la résistance qu'il est possible de vaincre avec la force dont on dispose est d'autant moindre que l'on a agrandi davantage l'amplitude du mouvement. C'est le cas de transformation habituelle du mouvement de va-et-vient de l'armature de l'électro-aimant. L'action de l'aimant sur une armature diminue énormément avec la distance ; il en résulte que l'amplitude de mouvement

qu'on peut donner à cette pièce est trop restreinte pour pouvoir être appliquée dans les machines. On l'augmente en appliquant la résistance à un long bras de levier; mais alors on diminue en proportion de l'augmentation d'amplitude du mouvement la résistance qu'il est possible de vaincre. Si, au contraire, on a à sa disposition une force faible, mais jouissant d'une grande amplitude d'action, on augmente la résistance qu'elle peut vaincre en diminuant le bras de levier de cette dernière force, mais cela aux dépens de l'amplitude du mouvement. Les leviers peuvent ne pas être rectilignes et avoir une forme quelconque. En général, la puissance et la résistance peuvent être appliquées en deux points quelconques d'un solide mobile autour d'un de ses points qui sert de point d'appui.

La transformation d'un mouvement de rotation continue en un autre mouvement de rotation également continue, se fait souvent au moyen d'une courroie ou corde sans fin. L'axe ou arbre moteur est muni d'une poulie, ainsi que l'axe à mettre en mouvement; une corde sans fin passe dans les gorges des deux poulies et est tendue à un certain degré. La pression que la tension de la

FIGURE 41.



corde produit contre la gorge de poulie empêche la corde de glisser, de sorte que, soit que la corde soit mise en mouvement ou que ce soit la poulie, l'une est entraînée par l'autre. Si donc on met en mouvement l'une des poulies, elle entraînera la corde dans son mouvement, et celle-ci entraînera la seconde poulie. Les chemins parcourus par un point de la corde ou par un point de l'une ou l'autre des deux poulies sont nécessairement les mêmes ; mais, comme les circonférences sont proportionnelles aux rayons, pour que les chemins parcourus par des points de ces circonférences soient les mêmes, il faudra que les nombres de tours faits par l'une ou l'autre de ces poulies soient en raison inverse des rayons. Les vitesses de rotation V et v seront donc en raison inverse des rayons :

$$V : v :: r : R.$$

La tension de la corde entre les points de tangence T et t est la même. Si la plus grande poulie est sur l'arbre moteur, il en résultera que la force qui devra produire en t la tension de la corde, devra avoir un moment d'inertie égal à celui de la résistance que la corde oppose à sa tension, en vertu de la loi des leviers que nous avons exposée plus haut. Soit θ la tension de la corde, il faudra donc que le moment d'inertie de la force motrice soit $R \theta$; de même la résistance au mouvement de l'arbre résistant devra avoir un moment d'inertie égal à celui de la résistance à la tension de la corde au point t , ce sera $r \theta$, ce qui nous fait voir que les moments d'inertie de la puissance et de la résistance sont en raison inverse des rayons des poulies. Donc, si, d'une part, on augmente la vitesse de rotation, d'autre part on augmente le moment d'inertie, par rapport à celui de la résistance. L'inverse aurait eu lieu si la grande poulie eût été sur l'arbre résistant et la petite sur l'arbre moteur.

Au lieu de faire mouvoir les deux roues au moyen d'une corde sans fin, on peut les presser l'une contre l'autre, et l'adhérence qui en résulte au point de contact fait que le mouvement de l'une entraîne le mouvement de l'autre. Du reste, les relations que nous avons établies entre la puissance et la résistance dans le cas précédent, ont encore lieu dans ce cas-ci. Ainsi les moments d'inertie de la puissance et de la résistance sont en raison inverse des rayons, et les vitesses de rotation sont également en raison inverse des rayons.

Dans ce mode de transmission de mouvement, il y a lieu de craindre le glissement d'une roue sur l'autre, ce qui aurait inévitablement lieu, si la première des deux roues l'une contre l'autre n'était pas assez considérable. C'est pour obvier à cet inconvénient que l'on a inventé les engrenages. On a muni le pourtour des deux roues de parties saillantes qui portent le nom de dents ; l'intervalle qui sépare les dents s'appelle des creux. Les dents de chacune des roues entrent dans les creux de l'autre ; les roues portent elles-mêmes le nom de roues dentées.

La forme à donner aux dents n'est pas indifférente. Il faut éviter que, dans le mouvement des deux roues, les dents ne s'arqueboutent les unes contre les autres, et que, par suite, le mouvement ne devienne impossible. En général, la forme des dents de l'une des roues est arbitraire. Mais cette forme une fois fixée, celle des dents de l'autre roue s'ensuit nécessairement ; elle se détermine par une épure géométrique que nous n'avons pas à indiquer ici. La figure habituellement adoptée pour les joues des dents est celle d'une développante de cercle ou d'un arc de cercle qui s'en rapproche. On appelle du nom de développante de cercle une courbe engendrée par l'extrémité d'un cordon flexible enroulé autour de la circonférence d'un cercle, et que l'on déroule ou

développe. On donne ordinairement la même forme aux deux joues des dents ; cela est indispensable dans le cas où le mouvement doit se transmettre dans un sens ou dans l'autre.

Le nombre des dents taillées dans chaque roue n'est pas indifférent ; il est clair, en effet, que si le rapport du nombre des dents est N pour l'une et N' pour l'autre, le rapport des vitesses des deux axes sera $\frac{N}{N'}$; il faudra donc, sous peine d'avoir d'énormes frottements, que les points moyens des contacts des dents se trouvent sur des circonférences naturellement tangentes et dont les rayons seront proportionnels au nombre des dents des deux roues.

Quand une des roues est très-petite par rapport à l'autre, elle porte le nom de *pignon*. Les pignons ont quelquefois la forme dite de lanterne. Ils sont alors composés de deux joues, reliées entre eux par des tiges de métal rondes, qui sont parallèles à l'axe et servent de dents. C'est cette forme qui lui a donné son nom. Bien entendu que, dans ce cas, la forme des dents de la roue qui conduit le pignon se trouve déterminée par celle des dents du pignon ; c'est, du reste, un mauvais engrenage.

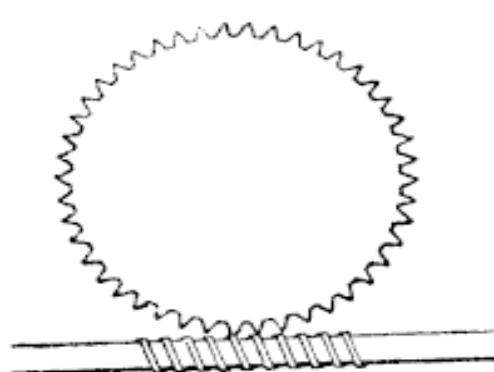
Les dents des engrenages ne roulant pas l'une sur l'autre, il y a un frottement qui use assez rapidement les dents, si la vitesse est un peu considérable ; il y aurait donc avantage à substituer le roulement au frottement dans les engrenages : c'est ce qu'on obtient au moyen des engrenages appelés hélicoïdaux. Les dents sont formées comme le filet d'une vis à pas très-allongée, dont la section est celle d'une dent d'engrenage ; c'est pour ainsi dire une série de roues dentées d'épaisseur infiniment mince, dont les dents avancent les unes sur les autres de quantités infiniment

petites et qui s'engrènent successivement, de sorte que le contact a toujours lieu sur la ligne qui joint les autres. Cet engrenage jouit de propriétés assez remarquables, entre autres celle de se perfectionner par l'usure, quand la forme primitive n'était pas très-exacte : aussi arrive-t-il que, comme cette forme d'engrenage est assez difficile à tailler, on se contente quelquefois d'obliquer les dents de la roue et celles du pignon, et pour augmenter l'action du frottement de ces roues imparfaites, on les fait tourner en les saupoudrant de sable : l'usure donne aux dents de la roue et du pignon la forme hélicoïdale.

Dans certains cas les axes de la roue et du pignon avec lequel elle s'engrène ne sont pas parallèles, mais sont situés dans un même plan et s'y rencontrent ; la roue et le pignon sont alors tous les deux coniques. Dans les mouvements d'horlogerie, l'angle des deux axes est un angle droit. Dans le cas d'engrenages de roues semblables qui portent le nom de roues d'angles, les surfaces qui forment les dents ne sont plus des cylindres, mais des cônes dont le sommet est le point de rencontre des deux axes. Le tracé des dents est plus compliqué, mais analogue à celui des roues cylindriques.

On sait aussi faire tourner un axe au moyen d'un autre axe qui n'est pas situé dans le même plan que lui. Une seule de ces transmissions est usitée : c'est celle où les deux axes sont perpendiculaires entre eux. Le problème se résout en faisant engrenner une roue dentée avec une vis engendrée par le mouvement hélicoïdal d'une dent de forme déterminée par la forme de la dent employée. Ordinairement la dent qui engendre la vis a ses flancs droits, et alors c'est la roue conductrice, dont les dents se trouvent déterminées par la forme adoptée pour la vis. Si nous supposons la vis verticale, la dent, en appuyant contre le filet de

FIGURE 42.

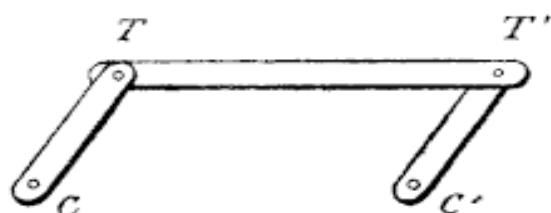


la vis qui est oblique par rapport à elle, le force à s'écartier en faisant tourner la vis autour de son axe. Cette transformation de mouvement a l'inconvénient de produire des frottements considérables des dents de la roue sur le filet de la vis : aussi cette vis est-elle ordinairement en acier. De plus, comme la pression à lieu obliquement, elle tend au renversement de la vis, ce qui produit un frottement des tourillons contre les parois des trous dans lesquels ils sont engagés. Le seul avantage qu'ils présentent, c'est de transformer un mouvement relativement lent en un mouvement très-rapide ; il suffit, en effet, que la roue tourne d'une quantité telle qu'une dent avance d'une longueur égale au pas de la vis, pour que cette dernière fasse un tour tout entier. Il est bien entendu que la vis ne doit présenter qu'une très-faible résistance à son mouvement de rotation. La transmission inverse, c'est-à-dire celle qui a lieu quand on veut transmettre à la roue le mouvement imprimé à la vis, est employée lorsque, n'ayant à sa disposition qu'une force faible, on veut vaincre une grande résistance ; dans ce cas, on perd en vitesse ce que l'on gagne en force.

La transformation d'un mouvement circulaire en un mouve-

ment alternatif se fait quelquefois au moyen d'un excentrique et d'une bielle. Cette transformation s'emploie pour transmettre à un arbre ou axe éloigné le mouvement circulaire d'un autre axe qui lui est parallèle. La bielle est une tige métallique rigide terminée par deux trous ou deux coussinets dont les centres sont à une distance l'un de l'autre égale à la distance des axes. Dans ces trous ou dans ces coussinets roulent deux tourillons T et T' fixés excentriquement aux deux roues; il est clair que dans ce cas les excentricités CT et $C'T'$ sont les mêmes pour les deux tourillons. Il existe dans ce cas deux points morts, c'est

FIGURE 43.

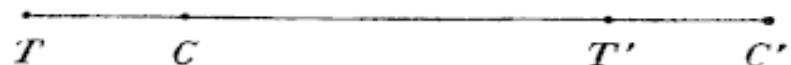


à-dire pour lesquels l'axe qui mène l'autre n'a aucune action sur ce dernier; c'est lorsque les deux tourillons T et T' se trouvent sur la ligne des centres, ou bien lorsque T ou T' se trouvent entre les deux, comme l'indiquent les figures ci-dessous.

FIGURE 44.

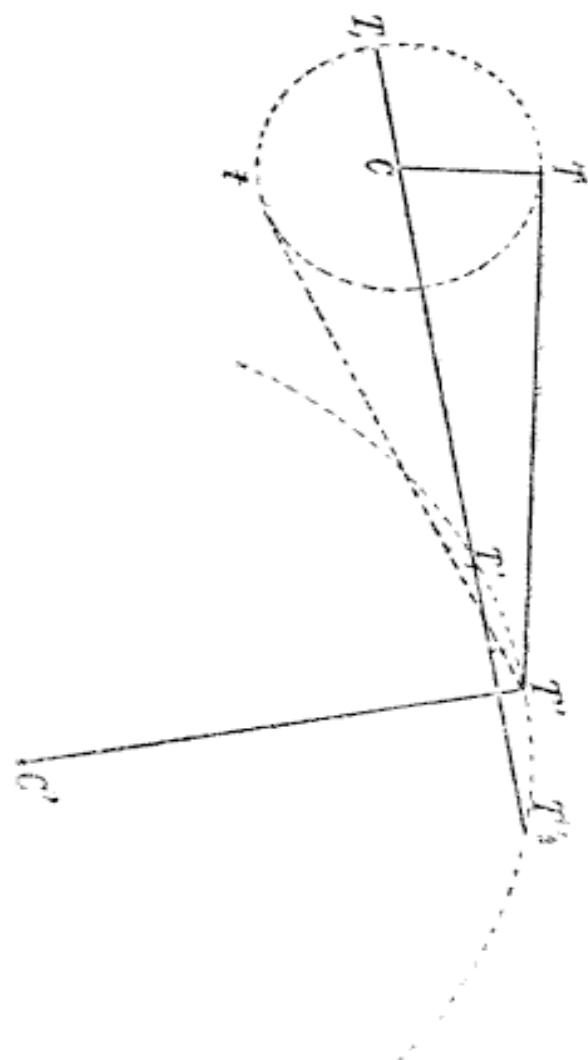


FIGURE 45.



Lorsque, dans la disposition précédente, les deux manivelles sont inégales, l'axe auquel se trouve attaché le plus grand levier ne peut plus faire qu'un mouvement circulaire oscillatoire donné

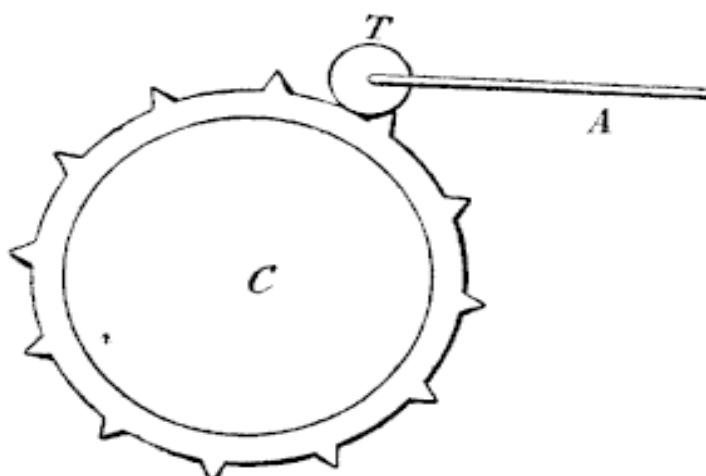
FIGURE 46.



par l'arc $T'_1 T' T'_2$ dont la corde est égale au diamètre $T_1 T_2$ de la circonference décrite par le petit levier; son prolongement passe par le centre C de cette courbe, la bielle est égale à $T_1 T'_1$ ou à $T_2 T'_2$. Le mouvement n'est pas uniforme, car pour un mouvement fini de la petite manivelle aux points T_1 et T_2 , on n'a qu'un mouvement infiniment petit de la grande manivelle aux points T'_1 et T'_2 . Ces points T_1 et T_2 sont ce que l'on appelle des points morts.

La transformation du mouvement circulaire en mouvement alternatif se fait quelquefois tout autrement. Un levier, muni souvent à son extrémité d'une roulette, s'appuie par cette pièce sur le bord d'une roue garnie de dents appelées cames, qui soulevent le levier, lequel retombe ensuite soit par son propre poids, soit par la pression d'un ressort. Les cames doivent être semblables sur leurs deux faces, si la roue à cames est susceptible de tourner dans les deux sens. La figure ci-dessous indique cette disposition usitée dans certaines machines électro-magnétiques.

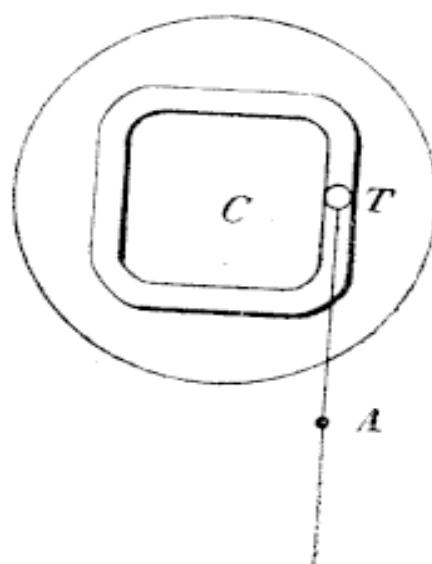
FIGURE 47.



On modifie aussi ce mode de transformation en creusant la

roue, sur une de ses faces, d'une rainure dans laquelle s'engage un galet fixé à l'extrémité du levier. Dans ce cas, il n'est pas

FIGURE 48.



nécessaire d'avoir un ressort ou un contre-poids pour ramener le levier à sa position première. C'est ce mode de transformation qui existe dans les manipulateurs des appareils français.

Les mouvements produits, comme nous l'avons indiqué précédemment, sont plus ou moins irréguliers; le mode de transformation du mouvement ajoute encore souvent à l'irrégularité. Pour rendre les mouvements obtenus réguliers, on emploie des pièces auxquelles on donne le nom de régulateurs. Ces régulateurs sont de diverses espèces: volants, régulateurs à force centrifuge, échappements, freins. Nous allons donner successivement une idée de chacun d'eux.

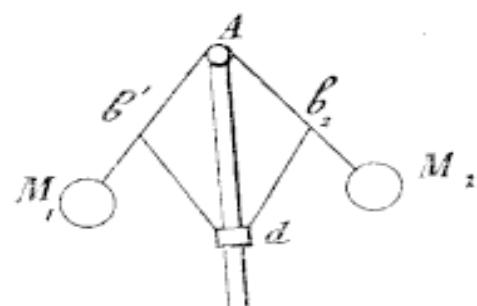
Lorsqu'une roue dont la jante est très-massive est mise en rotation rapide, si cette rotation n'éprouve que peu de résistance par elle-même, son mouvement ne peut être modifié que lentement; elle entraîne alors le moteur qui lui imprime le mouvement, ou lui résiste, selon que l'irrégularité de son mouvement produit une accélération ou un ralentissement. C'est un effet de cette propriété, inhérente à la matière, que l'on appelle inertie, et qui a pour résultat d'exiger, pour produire une modification quelconque dans le mouvement d'un corps, une force proportionnelle à cette modification et à la masse du corps qui la subit. Une roue composée comme celle dont nous venons de parler, étant appliquée à l'un quelconque des axes de rotation d'un mouvement, régularisera le mouvement en répartissant plus ou moins uniformément les variations qui se produisent dans le moteur. Prenons pour exemple le cas de la transformation d'un mouvement alternatif en un mouvement circulaire continu, indiqué dans la *fig. 46*. Nous avons vu que vers les points morts T_1 , T_2 , c'est-à-dire aux extrémités de la course du grand levier, il y avait une irrégularité très-grande entre le mouvement alternatif et le mouvement continu. Si donc nous supposons que le grand levier ait à transmettre, par ses oscillations, un mouvement continu au petit levier, quand celui-ci sera arrivé aux points morts, il devra recevoir un mouvement fini d'un mouvement infiniment petit du grand levier, ce qui revient à dire que ce dernier ne lui communique aucun mouvement, et que l'appareil s'arrêterait, si, au moyen de la vitesse acquise par le volant, le petit levier ne dépassait ces points morts et ne l'amenait en des points où le grand levier peut avoir action sur lui. L'action du levier conducteur sur le levier conduit est nulle aux points morts, et maximum aux points de tangence T t de la bielle avec la circonférence décrite par le petit levier. Le volant entraîne son axe aux points morts et finit par être entraîné par

lui; ce dernier effet est maximum aux points de tangence T et t . Il est clair que le mouvement ainsi obtenu n'est pas mathématiquement uniforme; mais il approchera d'autant plus de cette uniformité absolue que la quantité de mouvement acquise par le volant sera plus considérable. Les variations de mouvement, au lieu de provenir des variations de la transmission, peuvent provenir des variations de la résistance à vaincre; l'effet du volant est dans ce cas le même que précédemment.

Le volant, agissant par sa vitesse acquise, régularise les mouvements dont les variations n'ont qu'une durée restreinte; mais lorsque les variations ont une longue durée, il n'a plus aucun effet, ayant lui-même le temps de changer sa vitesse et, par suite, la quantité de mouvement dont il est doué. Pour régulariser les mouvements qui éprouvent des variations de longue durée, on agit soit sur le moteur, soit sur la résistance à vaincre, de manière à accélérer le mouvement qui se ralentirait, en augmentant la première force et diminuant la seconde, ou à agir inversement quand le mouvement s'accélère.

Le régulateur à force centrifuge agit sur le moteur. Il se

FIGURE 49.

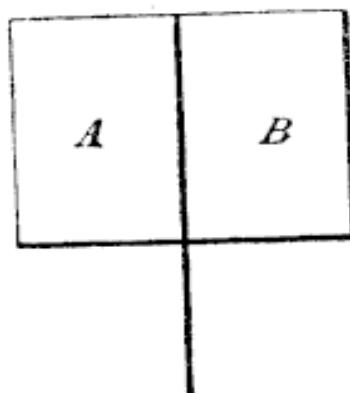


compose de deux petits pendules terminés par des boules assez

pesantes M_1 M_2 . Ces pendules s'articulent au sommet A d'un axe que la machine met en mouvement; deux autres tiges articulées sur les premières en b_1 b_2 s'articulent aussi à une douille d dans laquelle passe librement l'axe. De cette manière, en soulevant la douille, le parallélogramme s'aplatit et les masses M_1 M_2 s'écartent, ou bien, quand les masses s'écartent, la douille se soulève. Cette douille, par son mouvement oscillatoire, agit sur le moteur et lui donne une action plus ou moins libre, en ouvrant ou fermant l'orifice qui donne passage à la vapeur, dans les machines mues par cet agent, ou en augmentant la résistance d'un rhéostat intercalé dans le circuit, comme dans les machines mues par les courants électriques. Quand la machine est en mouvement, l'axe du régulateur tourne, et, à cause de la force centrifuge, les masses M_1 et M_2 tendent à s'écartier en prenant une position telle qu'il y ait équilibre entre cette force et la pesanteur, laquelle tend à ramener les boules le long de l'axe, avec une force d'autant plus grande que ces masses sont plus soulevées. Si la vitesse de la machine et par suite celle de l'axe du régulateur augmente, les boules M_1 M_2 s'écartieront davantage, la douille d sera soulevée et la force motrice sera diminuée. L'inverse aura lieu si le mouvement se ralentit. Cet appareil diminue donc les variations permanentes du mouvement des machines.

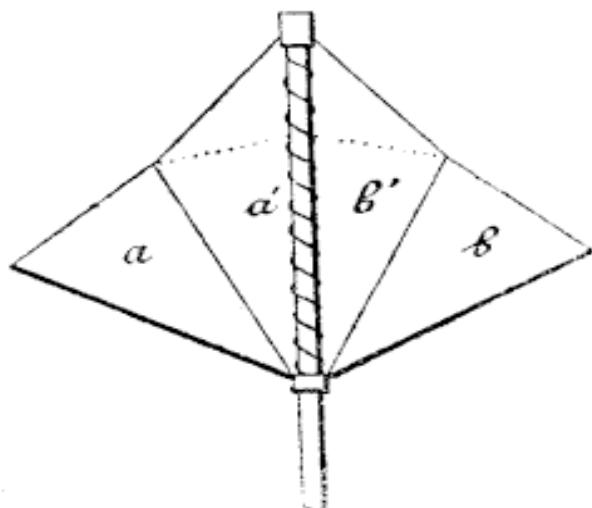
Il en est de même du volant à ailettes qui, dans sa forme la plus simple, se compose de deux plans très-minces A et B, passant par un axe mis en mouvement de rotation par la machine. La résistance qu'un corps plat mis en mouvement dans l'air éprouve de la part de ce milieu, croît environ comme le carré de la vitesse; il en résulte donc que si la vitesse double, l'axe du volant éprouve dans sa rotation une résistance quatre fois plus considérable, ce qui réagit contre cette accélération.

FIGURE 50.



On combine quelquefois le volant à ailettes avec le régulateur à force centrifuge. Des ailettes triangulaires, remplaçant les masses du régulateur à force centrifuge, sont fixées aux deux côtés d'un

FIGURE 51.

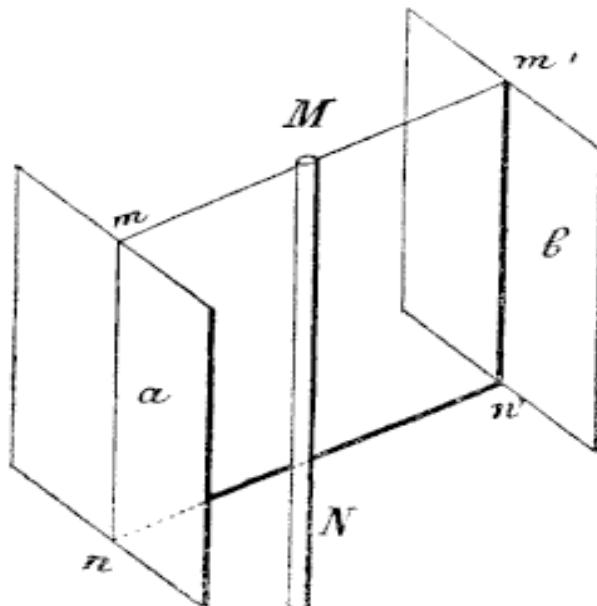


parallélogramme articulé, qui sont liés à l'axe de rotation du régulateur ; un ressort agissant sur la douille tend à rapprocher les ailettes. Quand l'appareil est en mouvement, la force centrifuge réagit contre le ressort de rappel, écarte les ailettes, et de là résulte

une plus grande amplitude de leur mouvement, par suite une vitesse plus grande et une résistance du milieu à peu près proportionnelle au carré de cette vitesse. En outre, le point d'application de la résistance de l'air, qui dépend de la forme de l'ailette et de la vitesse relative de ses divers points, s'écarte de l'axe de rotation, ce qui augmente encore l'effet de cette résistance sur l'axe et produit par suite une résistance plus considérable à l'accroissement de la vitesse. Quelquefois on fait en sorte que ces ailes mobiles a b , en se rapprochant de l'axe, soient plus ou moins cachées derrière des ailettes fixes a b , ce qui revient à la même chose que si les ailettes variaient d'étendue. La résistance que cet appareil oppose aux variations du mouvement est alors considérable.

On veut quelquefois faire varier à volonté le mouvement ; si l'on ne peut agir sur la force motrice, on augmente facultativement l'effet du volant à ailettes, soit en augmentant la surface de celles-ci, soit en changeant l'obliquité par rapport au mouvement. Elles sont alors mobiles autour de deux axes mn , $m'n'$ pa-

FIGURE 52.



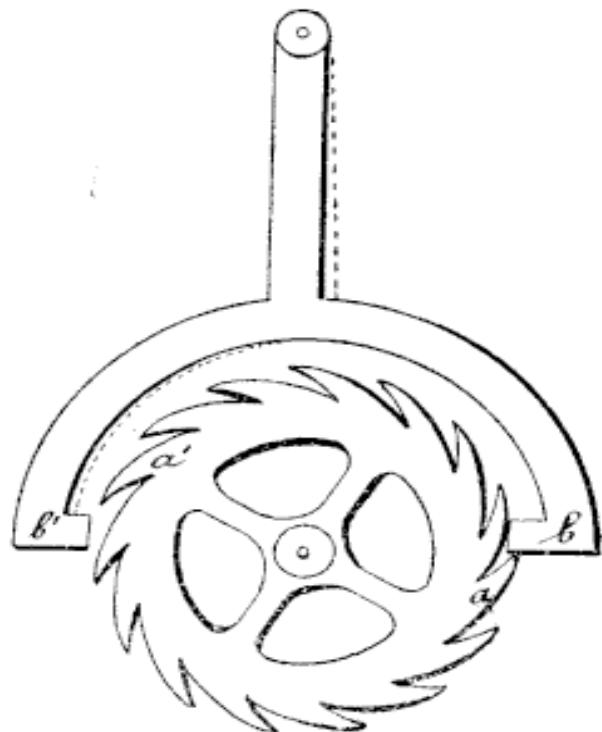
rallèles à l'axe de rotation MN ; quand elles sont dans le plan $mm'nn'$ qui passe par cet axe, elles éprouvent de la part de l'air le maximum de résistance ; quand, au contraire, elles sont perpendiculaires à ce plan, elles n'éprouvent plus qu'une résistance très-faible de la part de ce milieu.

On se sert aussi quelquefois de freins : ce sont des leviers garnis, plus ou moins près du point d'application, d'une pièce de nature variable selon l'effet que l'on veut produire, et que l'on appelle sabot. Ce sabot, en pressant plus ou moins fort contre un des axes de rotation, s'oppose, par suite du frottement, au mouvement de cet axe, et ralentit ainsi à volonté la vitesse que donnerait le moteur.

Lorsque le mouvement doit être très-régulier sans avoir besoin d'être continu, on régularise le mouvement au moyen d'un échappement ; c'est-à-dire que le mouvement se trouve arrêté, à des intervalles de temps réguliers, par un autre moteur qui ne remplirait pas les autres conditions exigées pour le résultat que l'on veut obtenir, mais qui aurait la régularité ou la variation cherchée. Un échappement se compose d'une roue à rochet, ces derniers étant de formes diverses selon la nature de l'échappement, et d'une pièce qui porte, comme le mode de régularisation du mouvement, le nom d'échappement ; elle sert par son mouvement à dégager et à arrêter alternativement les dents de la roue à rochet. Il y a un grand nombre d'échappements d'espèces différentes ; nous ne décrirons que ceux qui ont été employés en télégraphie.

L'échappement à ancre porte ce nom parce qu'il a quelque ressemblance avec la forme des pattes d'une ancre. On voit par la *fig. 53* que la roue ne peut tourner autour de son axe, parce

FIGURE 53.

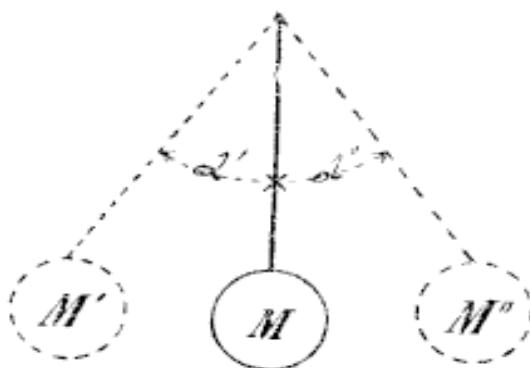


que la dent d'une roue mise en mouvement par le moteur vient buter contre le bec b de l'ancre. Quand cette ancre oscille elle dégage la dent a , et la roue s'avance d'une demi-dent, après quoi elle est arrêtée par la dent a' qui vient buter contre le bec b' . L'oscillation inverse dégage ensuite la dent a' , fait avancer la roue également d'une demi-dent et remet en prise la première dent a , et ainsi de suite. On voit donc qu'en faisant osciller l'ancre, on détermine quand on veut la rotation de la roue dentée d'une quantité égale à la moitié de l'intervalle de deux dents consécutives, et comme le mouvement tout entier est lié au mouvement de cette roue, on le fera marcher d'une quantité fixe pour chaque demi-oscillation qu'on imprimera à l'ancre.

Quand le mouvement doit être constamment régulier, on détermine l'oscillation de l'ancre au moyen d'un mouvement régulier, celui du pendule par exemple. Le pendule est une tige rigide,

légère, mobile dans un plan vertical ; il a souvent pour axe de rotation le système de couteaux dont nous avons parlé précédemment. Il est bien entendu que cet axe est horizontal. A l'extrémité de cette tige est fixé un poids auquel on donne souvent la forme d'une lentille dont l'axe est perpendiculaire au plan d'os-

FIGURE 54.

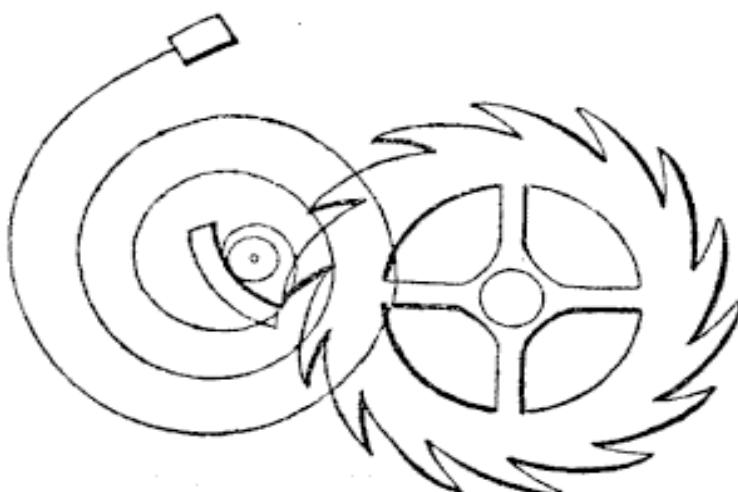


cillation. Cette forme lui a été donnée afin qu'elle éprouvât moins de résistance de la part de l'air dans son mouvement oscillatoire. Quand ce pendule est écarté de la verticale et qu'il fait avec sa position primitive un angle α' , si on l'abandonne à lui-même la pesanteur le ramène à la position verticale ; mais, en tombant, il a acquis une certaine vitesse ; il dépassera donc la verticale et s'éloignera de nouveau de cette direction jusqu'à ce que sa vitesse acquise ait été détruite par la pesanteur, et il fera à ce moment avec la verticale un angle α'' . Si nous ne tenons pas compte des frottements sur l'axe de rotation et de la résistance de l'air, cet angle α'' devra être égal à α' , car la quantité de mouvement acquise par une chute est égale à la quantité de mouvement détruite par une élévation égale ; le mouvement oscillatoire continuerait donc indéfiniment. La résistance de l'air et les frottements de la suspension empêchent qu'il en soit ainsi : l'angle α'' est plus petit

que l'angle α , et l'oscillation irait sans cesse en diminuant pour s'arrêter tout à fait, si on ne rendait au pendule, à chaque oscillation, la quantité de mouvement que les frottements lui ont fait perdre. C'est pour cela que les dents de la roue, au lieu de venir butter, comme la figure le représente, sur des plans perpendiculaires au mouvement, frappent contre des plans obliques, en sorte qu'à chaque battement la roue à rochet imprime à l'ancre, et par suite au balancier, un petit mouvement qui fait compensation aux pertes que les frottements lui ont fait subir.

Au lieu de mettre l'échappement en mouvement au moyen des oscillations d'un pendule, on le fait aussi au moyen d'un ressort en spirale, comme l'indique la figure ci-dessous ; du reste, le principe est le même que celui du pendule que nous venons de décrire.

FIGURE 55.



Quand l'échappement n'a pas pour but de régulariser le mouvement, mais de le faire varier à volonté, il est clair que l'obstacle qu'on oppose au dégagement de la roue ne doit être en au-

une façon influencé par le mouvement de cette pièce ; il devra donc présenter à ses dents un plan perpendiculaire à la direction de leur mouvement. On a donné à l'échappement, dans les appareils télégraphiques primitivement employés, la forme qu'indique la *fig. 56*. A l'axe d'oscillation de l'échappement on a fixé

FIGURE 56.



FIGURE 57.



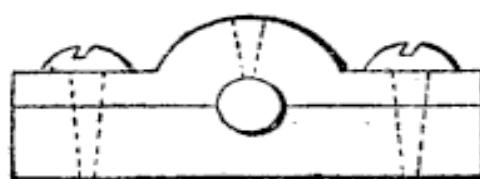
deux lames d'acier obliques l'une par rapport à l'autre, mais d'une obliquité telle, *fig. 57*, que vues suivant la direction de l'axe d'oscillation, l'une recouvre un peu l'autre. Les dents de la roue à rochet viennent ainsi rencontrer successivement les deux lames, selon que par la position extrême de l'oscillation l'une ou l'autre se trouve dans le plan de la roue. Du reste, par la disposition que nous avons indiquée, la dent rencontre nécessairement la première lame d'abord, la seconde ensuite.

Toutes les machines se composent donc en définitive d'un certain nombre d'axes tournant avec plus ou moins de rapidité. Ces axes sont terminés par des parties plus minces, appelées tourillons ou pivots, qui tournent dans des trous ronds en frottant contre leurs parois. Ce mouvement produit un glissement plus ou moins grand, et par suite un frottement, selon la nature des deux métaux frottants et selon l'état de leurs surfaces. Si un corps gras est interposé entre eux, le frottement diminue beaucoup ; il faut donc avoir soin d'entretenir d'huile toutes les parties frottantes des ma-

chînes. Plus les pivots sont gros, plus la résistance que le frottement oppose au mouvement de l'arbre est éloignée de son axe, et par conséquent plus il a de puissance; il faut donc rendre ces pivots aussi minces que possible; mais, d'un autre côté, il faut qu'ils aient une grosseur qui leur procure une solidité suffisante. En général, pour avoir le moins de frottement possible il faut que les corps frottants soient de dureté différente. Il est bien entendu que le corps le plus mou s'use le plus; il faudra donc employer pour les arbres les métaux les plus durs et les plus résistants, tels que l'acier, le fer, et réservier les autres pour les pièces où se trouvent les trous. Afin d'éviter le ballottement des arbres on fait porter le bord des trous dans lesquels tournent leurs pivots contre des parties saillantes que l'on appelle *embases* ou *collets*.

Les trous sont souvent percés dans des pièces d'un seul morceau que l'on évase du côté extérieur afin de diminuer la longueur de la portée des pivots et par suite leur épaisseur. Le plus souvent ces pièces sont composées de deux parties attachées l'une sur l'autre au moyen de vis; elles portent le nom de coussinets et ont la forme indiquée dans la figure ci-contre.

FIGURE 58.



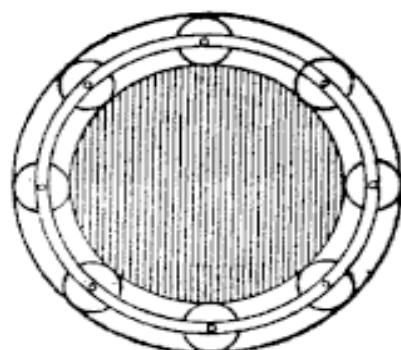
Lorsqu'il n'y a pas lieu de craindre que l'arbre soit soulevé, on ne se sert que de la moitié inférieure du coussinet,

Quand le coussinet a deux pièces, la pièce supérieure est percée d'un trou qui pénètre jusqu'à l'axe et par lequel on introduit l'huile qui doit lubrifier ce dernier.

Dans certains cas on obtient un frottement plus doux en terminant les pivots par des pointes en forme de cône qui pénètrent dans des trous aussi en forme de cône, mais un peu plus ouverts. Cette pièce porte alors le nom de crapaudine et est faite des matières les plus dures : dans l'horlogerie, ces crapaudines sont souvent en pierres précieuses.

Lorsque le mouvement doit être doux, bien que l'arbre doive cependant avoir de fortes dimensions, on emploie, pour diminuer le frottement, l'artifice suivant : une série de petits cylindres ap-

FIGURE 59.

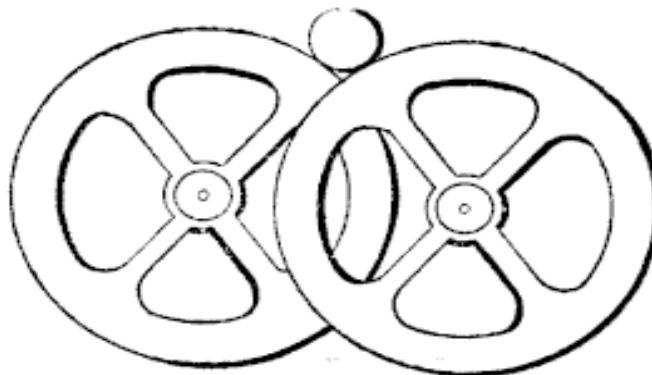


pelés galets sont disposés circulairement et maintenus à la même distance les uns des autres au moyen d'axes s'engageant dans des trous pratiqués dans deux plaques circulaires qui font fonction de chappes. Ces galets sont tangents extérieurement à l'arbre et intérieurement au trou dans lequel l'arbre doit tourner et qu'on fait plus grand que lui. De cette manière, l'arbre roule sur les

galets et ceux-ci sur la partie intérieure du trou. On n'a ainsi qu'un frottement de roulement bien moindre que celui provenant du glissement. Nous ne tenons pas compte du frottement des axes des galets dans leurs trous, mais ce dernier est très-faible à cause du peu de pression que les axes supportent, et en outre de la finesse qu'on peut alors leur donner.

Quand on n'a pas à craindre l'enlèvement de l'axe de dessus son support, on le place au point de rencontre de deux roues

FIGURE 60.



qui se croisent. Ces roues sont assez grandes, de sorte que l'arbre fait un grand nombre de tours pour un seul des roues. De cette manière la résistance des axes des roues a peu d'effet sur le mouvement de l'axe principal qui agit sur un grand levier.

Lorsque la rotation ne doit pas être complète, on fait tourner l'axe sur les tranchants de deux prismes triangulaires appelés *couteaux*, qui portent sur deux pièces planes ou légèrement concaves ; les couteaux et leurs plans doivent être, les uns et les autres, en matière très-dure. On substitue ainsi un roulement très-faible, celui de la tranche du couteau, nécessairement tou-

jours un peu arrondie, au frottement par glissement. Toutefois il est clair que l'axe ainsi disposé ne doit avoir aucune tendance à être entraîné dans le sens du plan sur lequel il appuie.

Les trous ou les coussinets sont portés par des plaques de métal qui portent le nom de platines. Les platines sont maintenues à la distance qu'elles doivent avoir au moyen de cylindres métalliques fixés aux plaques par des vis. Ces cylindres portent le nom de pilier.

Afin d'ajuster les axes à la distance convenable pour que les roues s'engrènent facilement, on perce souvent la roue de trous assez grands pour que les axes y passent librement, et les trous des pignons sont pratiqués dans des pièces additionnelles que l'on assujettit sur la plaque au moyen de vis ; ces pièces portent le nom de ponts. Quand l'axe doit dépasser l'une des platines on donne au pont la forme du Z aplati ou de deux ZZ accouplés.

FIGURE 61.



§ III.

DES ORGANES DES APPAREILS TÉLÉGRAPHIQUES MIS DIRECTEMENT EN JEU PAR LES COURANTS.

Nous avons vu que les signaux télégraphiques étaient produits par les variations de durée et de sens qu'éprouvent les courants

électriques envoyés sur les lignes ; il faut donc qu'à l'extrémité se trouvent des organes qui manifestent la présence de ces courants et souvent leur sens. Un courant peut manifester sa présence de diverses manières, en agissant sur les organes de l'homme ou des animaux par les actions physiologiques qu'il produit, ou en agissant soit sur les conducteurs, soit sur les corps magnétiques qui se trouvent à sa portée.

La première propriété ne peut fournir à proprement parler un système télégraphique ; ce serait plutôt un moyen de correspondance secrète entre deux personnes en présence d'un public : aussi n'en parlerons-nous pas. L'action qu'un courant exerce sur son propre conducteur varie avec la nature de ce conducteur ; ainsi si le corps est chimiquement simple ou plutôt radical, il conduit l'électricité en s'échauffant plus ou moins, selon la résistance qu'il oppose au passage du courant ; cet échauffement peut aller jusqu'à l'incandescence : si le corps est composé, le courant le décompose en ses éléments. Cette dernière action est la seule qui serve en télégraphie : elle donne les appareils connus sous le nom d'appareils électro-chimiques. L'action du courant sur les corps magnétiques est diverse : si ce corps est un aimant permanent, comme une aiguille aimantée, il la dévie jusqu'à ce qu'elle occupe une position perpendiculaire à ce courant ; si le corps n'est pas aimanté et qu'une portion du conducteur fasse un certain nombre de circonvolutions autour de lui, ce corps s'aimante. Ces deux dernières actions sont employées l'une et l'autre en télégraphie ; nous aurons donc à étudier successivement les trois modes suivants de manifestation du courant, savoir : l'action chimique, l'action sur les aimants, et celle sur les corps magnétiques non aimantés.

Nous avons vu que lorsqu'un courant traversait un corps com-

posé de deux radicaux simples ou composés, il les séparait; l'un se rendant à l'électrode positif, l'autre à l'électrode négatif, se combinant avec eux s'ils en sont susceptibles. Si le sel décomposé était incolore et que les produits de la décomposition fussent colorés, on voit que le passage du courant donnera un produit coloré. Les deux sels que l'on peut employer sont l'iodure de potassium avec des électrodes en platine, et le cyanure double de potassium et de fer avec un électrode positif en fer. Le premier donne à l'électrode négatif de l'iode de couleur violette, et le second à l'électrode positif du bleu de Prusse fortement teinté en bleu. Voici les formules qui indiquent ces décompositions : l'iodure de potassium a pour formule KI , le potassium qui se rend à l'électrode positif décompose l'eau, et on a sur cet électrode de la potasse et de l'hydrogène, sur l'autre de l'iode; toutefois, cet état de choses ne subsiste pas longtemps, par suite de la volatilisation de l'iode et de sa dissolution dans la potasse produite. La trace du courant n'est donc pas permanente, c'est pour la télégraphie un grave inconvénient qui n'est pas compensé par la facilité de la décomposition de cette substance par le courant.

Le cyanure jaune de potassium et de fer ou prussiate jaune de potasse a pour formule $Fe Cy + 2 R Cy + 3 HO$. Trois de ces équivalents sont décomposés par trois équivalents de courant et l'électrode positif, en se dissolvant, donne du bleu de prusse $3 Fe Cy + 2 Fe^2 Cy^3$ insoluble, et par conséquent très-stable; sa couleur est comme on sait d'un bleu très-intense; malheureusement sa décomposition ne se fait que difficilement par le passage du courant; de là résulte la nécessité de rendre le produit acide au moyen d'acide chlorhydrique; on a ainsi un dégagement perpétuel d'acide chlorhydrique et d'acide prussique, nuisible pour la santé des employés et pour les appareils. Voici comment

M. Bain préparait cette substance : il versait de l'acide nitrique dans une dissolution de prussiate jaune de potasse jusqu'à ce que sa couleur devint d'un vert foncé ; il versait alors de l'acide chlorhydrique qui la ramenait au blanc, et c'est cette liqueur qui était soumise à l'action décomposante du courant.

Pour obtenir des signaux au moyen de liqueurs susceptibles d'être colorées par la décomposition qu'éprouve le courant, ou imprègne avec cette liqueur du papier, et on fait courir sur lui soit les deux électrodes si le papier n'est placé que sur une substance isolante, soit sur l'un d'eux si la feuille est en contact sur une masse métallique en communication avec l'autre électrode. La première méthode est préférable, car le courant éprouve moins de résistance et les signaux sont plus nets, le courant n'éprouvant pas une dispersion à travers le papier pour atteindre l'autre électrode. Quand le papier est complètement humide comme dans le procédé Bain, il est impossible de faire mouvoir le papier en tirant sur lui ; il faut, soit faire mouvoir les électrodes, ce qui est très-difficile à cause de la permanence des communications avec les pôles de la pile, soit placer le papier sur une plaque qui se meut. M. Bain se servait d'un plateau tournant sur lequel il plaçait le papier, et le style en fer s'éloignait du centre du plateau à mesure que ce dernier tournait. Il en résultait que la pointe du style décrivait une spirale sur le papier, et que sa trace était marquée en bleu pendant toute la durée du passage du courant. Nous parlerons plus loin des inconvénients qu'offrait son système au point de vue télégraphique ; nous n'avons ici pour but que d'indiquer un procédé d'impression de signaux au moyen de la décomposition qu'opère le courant passant au travers de papier humide.

Pour terminer avec l'impression électro-chimique, nous allons

décrire les modifications introduites dans le mode d'impression de M. Bain. M. Pouget, inspecteur des lignes télégraphiques, reconnaissant l'inconvénient que présentait le dégagement des vapeurs acides provenant du liquide de M. Bain et la difficulté que présente la lecture de signaux tracés en spirale, a modifié de la manière suivante le liquide de M. Bain. Il a pris du prussiate de potasse seulement, et il l'a mélangé avec de l'azotate d'ammoniaque cristallisé, et la composition du liquide employé était la suivante :

Eau	100	parties.
Azotate d'ammoniaque cristallisé.	150	—
Prussiate jaune de potasse. . . .	5	—

L'azotate d'ammoniaque qui est un sel déliquescents avait pour but de maintenir le papier à un degré suffisant d'humidité; pour que le papier n'eût pas besoin d'être fraîchement préparé, il augmentait également la conductibilité de l'électrolyte; le papier avait en outre une solidité suffisante pour être découpé en bandes et être entraîné par son passage à travers un lamoir, ce qui donne des signaux tracés en ligne droite. Ce papier devait toutefois être conservé dans des pots de grès pour conserver l'humidité suffisante; il avait alors quelquefois l'inconvénient de se moisir. Le papier ainsi préparé offrait une résistance très-considerable au courant: aussi M. Pouget n'opérait-il la décomposition qu'au moyen d'une pile locale, dont le circuit se formait par le passage du courant de ligne au moyen de l'appareil connu sous le nom de relai.

D'autres constructeurs n'emploient pas de papier préparé d'avance, ils préparent le papier au fur et à mesure de son déroulement, en le faisant frotter contre le bout d'une éponge qui plonge dans le liquide. C'est ce procédé qui a été employé dans

un appareil, système Gintl, qui se trouve au musée de l'administration télégraphique.

Les traces marquées sur du papier imprégné d'un électrolyte, présentent plusieurs inconvénients ; tant que le courant passe, bien qu'affaibli il marque une trace sur le papier; aussi les prolongations du courant provenant de la décharge du fil, après que le courant a cessé d'être envoyé sur la ligne, est-elle un grave obstacle à la rapidité des signaux. Quand la ligne est un peu longue ou sous-marine, les points deviennent des traits, les intervalles entre les éléments des signaux disparaissent, et l'on n'a bientôt plus qu'une ligne continue variant seulement d'épaisseur dans les intervalles correspondants à l'absence d'envoi du courant. Bien entendu que l'emploi du relai lève complètement cette difficulté. Les styles frottant contre du papier humide l'éraillent, se chargent de grumeaux qu'on est obligé d'enlever fréquemment. Enfin, M. l'abbé Caselli, inventeur d'un système autographique, prétend que les électrodes se polarisent, ce qui détermine des marques anormales sur le papier. On sait que lorsque des électrodes servent à décomposer un corps quelconque, ils se chargent l'un et l'autre d'une couche mince des radicaux séparés par l'électrolyte; la tendance qu'ont ces radicaux à se recombiner, détermine après le passage du courant un courant de sens inverse.

M. Morse est l'inventeur du système d'impression des signaux ; il essaya divers systèmes : l'encre ordinaire, la combustion du papier au moyen d'un fil traversé par un courant assez fort pour s'échauffer de manière à noircir le papier avec lequel il se trouvait en contact. Il s'arrêta en dernier lieu au gaufrage du papier au moyen d'une pointe sèche. Une bande de papier est tirée au moyen d'un laminoir composé de deux rouleaux dont

l'un est mis en mouvement par un moteur quelconque; l'un des deux rouleaux est entaillé en son milieu de manière à présenter une rainure. Le style est placé de manière qu'en pressant contre le papier il le force à entrer dans la rainure. Il presse le papier chaque fois que le courant passe et pendant toute sa durée, étant fixé à une des extrémités d'un levier, à l'autre extrémité duquel est fixée l'armature mobile d'un électro-aimant mis en activité soit directement par le courant de ligne, soit par un courant de pile locale, dont le circuit est formé par un relai mis en mouvement par le courant de ligne. La première disposition ne peut avoir lieu que pour des lignes extrêmement courtes, à cause de la force considérable qu'exige le gaufrage du papier, et que peut produire l'aimantation engendrée par un courant affaibli par la résistance que lui aurait offerte un conducteur de grande longueur.

Ce gaufrage du papier présente plusieurs inconvénients : 1^o lecture difficile, qui ne peut avoir lieu que suivant une direction fixe par rapport aux rayons éclairants, ce qui complique l'installation des postes; 2^o courant considérable et par suite emploi du relai, ce qui complique l'appareil aux dépens de la marche régulière des transmissions. Aussi s'est-on efforcé de changer le mode de signaux; c'est pour obvier au premier de ces inconvénients que M. Pouget avait si heureusement modifié le procédé de Bain, et l'avait combiné avec le relai employé par Morse, mais inventé par M. Wheatstone.

M. le docteur Dujardin, de Lille, avait précédemment et dès le commencement de l'établissement des lignes électriques en France essayé de modifier le procédé Morse et d'avoir des signaux colorés au moyen d'un faible courant. Il faisait plonger dans un encrier une pointe fixée à l'extrémité d'un levier mis en mou-

Venirent par un électro-aimant : quand le courant passait, la pointe était soulevée et toute humide d'encre venait marquer un point sur du papier. Ce système ne pouvait donner que des points. M. Dujardin avait formé un alphabet qui n'exigeait qu'un petit nombre de points. L'emploi de l'encre ordinaire, qui se sèche et qui se renverse facilement, est un grave inconvénient que présentent également quelques systèmes dont nous allons parler.

Un Allemand, M. John, pour avoir les signaux de M. Morse composés de traits et de points, fit plonger dans l'encre ordinaire un tire-ligne qui s'y chargeait d'encre et était par conséquent susceptible de marquer sur le papier un trait d'une certaine longueur. A peu près en même temps que MM. Digney frères proposèrent le système que nous allons décrire tout-à-l'heure, M. John substitua au tire-ligne une molette plongeant toujours dans l'encre liquide, et qui, en étant pressée contre le papier, était entraînée par le frottement de ce dernier et venait ainsi appliquer les divers points de sa circonférence sur lui, en y marquant un trait quand le contact avait été suffisamment long.

M. Digney frères, avec le concours de M. Félix Baudoin, inventèrent en même temps que M. John la molette et l'appliquèrent d'une manière beaucoup plus heureuse que lui. La molette s'encre dans ce système non plus en plongeant dans l'encre ordinaire, mais en se pressant contre un cylindre garni d'un drap et imbibé d'encre d'imprimerie. La molette n'est plus ici placée à l'extrémité du levier imprimeur, comme dans le système de M. John ; elle est fixe, et c'est le papier qui est pressé contre la molette au moyen de l'extrémité du levier recourbée et taillée en lame, ce qui ne fait presser le papier que suivant une ligne mince. Cette disposition simplifie beaucoup la construction et permet d'imprimer à la molette un mouvement de rotation en sens inverse de celui que

tendrait à lui imprimer le papier, ce qui donne une grande netteté aux signaux ainsi tracés. Ce système d'impression est sans conteste celui qui présente le plus d'avantages. Il exige une faible force pour être mis en mouvement, et peut être ainsi mis directement en mouvement par le courant de ligne.

M. Wheatstone, pour diminuer encore la force exigée et pouvoir ainsi former avec sécurité des signaux au moyen de l'inversion des courants, est revenu à l'emploi de l'encre ordinaire. Son encre est contenue dans un godet dont le fond est percé d'un trou capillaire. On connaît la propriété des tubes capillaires, laquelle consiste à ne laisser passer les liquides qu' comprimés sous une certaine pression ; une pointe s'enfonce dans le liquide, et en s'abaissant peut passer par le trou capillaire ; on conçoit qu'inévitablement elle est chargée d'une gouttelette d'encre qui se dépose sur le papier contre lequel vient buter la pointe. C'est un procédé très-ingénieux, mais qui ne peut donner que des points et qui offre tous les inconvénients de l'emploi de l'encre liquide ; mais comme la seule force à vaincre est le frottement du liquide, une force très-faible suffit pour mettre l'appareil en mouvement.

On peut aussi marquer des traits sur le papier au moyen d'un crayon qui, fixé à l'extrémité du levier mis en mouvement par le courant, vient s'appuyer lorsqu'il passe sur une feuille de papier ; mais le crayon s'use et ne marque bientôt plus de trace. M. Froment a eu l'heureuse idée de faire tailler automatiquement le crayon, en lui imprimant un mouvement de rotation sur lui-même ; on voit que le crayon a ainsi toujours la forme d'un cône. M. Bréguet a aussi proposé d'avoir une molette en mine de plomb tournant sur elle-même. Néanmoins, si on forme des signaux ordinaires composés de traits et de points, on serait

oblige de rapprocher le crayon au fur et à mesure qu'il s'usera. M. Froment a substitué au contact plus ou moins prolongé avec le papier, un contact permanent, mais variable de position dans le sens perpendiculaire au mouvement de la bande de papier. Quand le courant ne passe pas, le levier étant au repos, le papier marque une ligne sur la bande; quand le courant passe, le levier s'écarte à droite et le crayon marque une ligne supérieure sur le papier: on a ainsi des signaux analogues aux suivants dans lesquels les sommets des



Y renversés correspondent aux points des signaux actuels, et les traits de la ligne supérieure aux traits actuels. Le signal précédent correspond donc au signal Morse suivant :

• . — — .

Les Anglais se servent d'un télégraphe dans lequel les signaux sont formés par la combinaison des oscillations d'une aiguille; on se sert d'une, de deux ou de plusieurs aiguilles. Ces aiguilles peuvent être mises en mouvement soit par un cadre galvanométrique agissant sur une aiguille aimantée, soit par les pôles d'un électro-aimant agissant sur un seul pôle d'un barreau aimanté, susceptible d'osciller autour de son centre. Le mouvement de ces appareils n'est géné que par de faibles frottements, aussi une force légère est-elle parfaitement suffisante pour les mettre en activité.

D'autres télégraphes, auxquels nous donnerons le nom de télégraphes à échappements, se composent d'un mouvement d'horlogerie dont l'échappement se fait au moyen de l'armature d'un électro-aimant fixé au balancier : le mouvement se trouve ainsi fixé par le passage du courant, et indiqué par la position d'une ou plusieurs aiguilles. Quelquefois ces signaux sont imprimés : l'aiguille est alors remplacée par une roue portant à sa circonference, gravés en relief, les différents signes que l'on veut produire. Quand, par suite d'un nombre convenable d'émissions de courants, le signe à produire est arrivé au point où l'impression est susceptible de se faire, la lettre se trouve pressée fortement contre le papier, et comme les lettres sont toutes encrées par leur frottement contre un rouleau imprégné d'encre d'imprimerie, la lettre se trouve par cela même imprimée. La pression réciproque de la lettre et du papier peut se faire soit par le déplacement de la roue type, soit par celle de la seule lettre à imprimer (les lettres ne sont alors fixées à la roue que par des ressorts), soit enfin par pression du papier contre la roue à types. Ces mouvements peuvent se produire de diverses manières : par le déclenchement d'un mouvement agissant sur un marteau, ou par la production directe de ce mouvement du marteau. Ces deux effets ont lieu au moyen d'un électro-aimant spécial qui n'agit pas pendant le mouvement de la roue type, soit que ce mouvement rompe son aimant, soit qu'il ne cesse d'agir sur son armature que lorsque le courant cesse d'exister pendant un temps suffisamment long, ou qu'au contraire il n'agisse sur cette pièce que lorsque le courant agit pendant un temps suffisamment long. Enfin, on peut faire en sorte que l'aimant qui détermine l'impression n'agisse que par un courant d'une énergie déterminée ou de sens convenable, ou provenant d'un fil autre que celui qui sert à produire le signal. L'électro-aimant qui agit directement sur le marteau imprimeur doit avoir une grande force;

il ne peut donc être aimanté que par le courant d'une pile locale dont le circuit est fermé par un relai, lorsque l'impression se trouve déterminée par un courant provenant de loin et ayant par conséquent parcouru une grande résistance.

On voit, d'après ce que nous venons de dire des pièces qui sont directement mises en mouvement par les courants, que ce mouvement est produit soit par un cadre galvanométrique agissant sur une aiguille aimantée, soit par un électro-aimant agissant sur son armature. Pour compléter cette étude, nous indiquerons une disposition susceptible d'être employée pour produire un mouvement au moyen d'un courant aussi faible que l'on voudra : c'est une espèce de rhéoscope qui, dans certaines circonstances, pourrait peut-être être employé avec avantage. Déterminons donc les dimensions et la forme des diverses pièces qui composent ces organes des appareils télégraphiques, dans le but de produire tel ou tel effet.

Le cadre galvanométrique agissant sur une aiguille aimantée, ne peut donner qu'une force très-faible, aussi ne doit-on chercher à produire avec cette faible force que des effets faibles aussi prompts que possible.

Nous avons déjà vu bien des fois qu'un moyen de rendre plus rapide le mouvement d'une pièce, était d'alléger cette pièce autant que possible, puisque la force nécessaire pour mettre en mouvement un corps est proportionnelle à sa masse et à la vitesse imprimée ; d'où résulte que pour une force donnée, plus la masse sera faible, plus la vitesse imprimée sera grande. L'aiguille du galvanomètre devra donc être allégée autant que possible, mais il faut que la force ne soit pas diminuée pour cela ; car, dans ce cas, on perdrat d'un côté ce que l'on gagnerait de l'autre ; aussi, la forme en losange que

Octobre 1859.

12

l'on donne ordinairement aux aiguilles des galvanomètres n'est-elle pas heureuse; un barreau prismatique est préférable. La force qui agit sur le barreau est proportionnelle au nombre de tours que le conducteur fait autour du cadre, et comme c'est le barreau qui seul est mobile, il y a avantage à ce que le barreau ait une masse moindre, quitte à ce que son moment magnétique (1) soit moindre, pourvu que le nombre de tours que fera le conducteur compense cette diminution.

L'action d'un courant sur un barreau suspendu est proportionnelle au nombre de tours et à l'intensité du courant, mais cette dernière quantité est en raison inverse de la résistance que le courant doit vaincre; de là résulte que la diminution d'épaisseur du fil conducteur enroulé sur le cadre galvanométrique, si la couche de fil garde une épaisseur constante, agit de deux manières différentes et contraires sur l'action que le courant exercera sur l'aiguille. D'une part, elle augmente cette action, puisqu'elle permet d'envelopper le cadre d'un plus grand nombre de fils; d'autre part, elle la diminue en augmentant la résistance au courant, et par conséquent en diminuant son intensité. On peut se demander dans quelle proportion se produisent ces effets contraires, et quelle sera la dimension la plus avantageuse à donner au fil.

Nous avons vu (page 63) que l'effet sera maximum quand on aura donné au fil une section telle que la résistance du fil galvanométrique enveloppé soit égale à celle que le courant éprouvé en dehors de l'instrument.

(1) Le moment magnétique d'un barreau est le produit de sa force magnétique par la distance du pôle au centre du barreau; ainsi: un barreau de même force qu'un autre, mais dont la distance des pôles sera deux, trois fois plus considérable, aura un moment magnétique deux, trois fois plus considérable que le premier.

On devrait donc habituellement adopter cette disposition, si d'autres considérations ne forçait pas de s'écartez de cette règle. D'abord cette loi suppose que le courant est établi d'une manière définitive. Si le temps que met le courant à atteindre cet état stable est considérable, soit par la longueur du conducteur, soit par l'effet d'induction, et par suite de condensation électrique qui a lieu dans les conducteurs sous-marins, on devra se tenir au-dessous de la limite que nous venons d'indiquer, laquelle ne donnerait plus, dans ce cas, le maximum de vitesse pour le mouvement de l'aiguille.

Pour augmenter l'action du courant sur l'aiguille, on le fait souvent agir par l'intermédiaire d'un électro-aimant, entre les pôles duquel oscille l'aiguille. En appliquant au fil de l'électro-aimant le même calcul que pour le fil du galvanomètre, on trouverait que pour obtenir le maximum d'effet, il faut que la résistance du fil soit égale à celle de la ligne. Toutefois, dans ce calcul, on ne tient pas compte de diverses circonstances, telles que l'épaisseur de l'enveloppe du fil, sa forme, etc. Mais comme les télégraphes à aiguilles ne sont pas employés en France, nous ne parlerons des modifications à apporter au calcul dont nous parlons qu'en traitant des électro-aimants avec armatures, ce que nous allons faire maintenant.

Les électro-aimants sont des pièces composées d'un noyau en fer enveloppé d'un fil conducteur recouvert d'un corps isolant, afin de séparer les unes des autres les diverses couches de fil. Ces électro-aimants ont un certain nombre de points remarquables appelés pôles, qui sont les points d'application des résultantes des forces magnétiques qu'on peut développer dans un aimant. Ces électro-aimants s'aimantent lorsqu'un courant traverse le fil qui les enveloppe et se désaimantent lorsqu'il cesse; l'aimantation est proportionnelle dans une certaine li-

mite à l'intensité du courant (1). On appelle armatures mobiles les pièces de fer ou d'autre métal magnétique qu'attirent ces aimants temporaires ; cette attraction est proportionnelle au carré du magnétisme de l'aimant, et par conséquent au carré de l'intensité du courant qui détermine cet état. Lorsque l'armature est elle-même aimantée, l'attraction est de beaucoup augmentée.

On peut donner aux noyaux en fer des électro-aimants diverses formes ; les plus usitées sont la forme en barreau et celle en U ou en II. La première, qui n'a qu'un noyau cylindrique, a son fil recouvert enroulé sur une bobine dans l'axe de laquelle passe le fer à aimanter. Pour la forme U ou en II, on emploie deux bobines dans l'axe desquelles passent les branches du fer. La forme la plus usitée en télégraphie, la seule usitée en France, est la forme en II ; les deux branches sont des cylindres en fer, la traverse est une barre de fer carrée ou rectangulaire fixée aux branches par deux vis. La traverse porte aussi le nom d'armature fixe. D'autres formes ont été proposées ; on a fait entre autres des électro-aimants à trois branches parallèles réunies par une traverse, dans lesquels la branche du milieu était seule armée d'une bobine. D'autres électro-aimants étaient composés d'un axe cylindrique en fer sur lequel était fixée la bobine, qui, elle-même, était enveloppée d'un cylindre creux en fer formant manchon. L'armature fixe était alors un plateau circulaire en fer fixée par des vis à l'axe et au manchon ; l'armature mobile

(1) Cette proportionnalité n'a pas lieu indéfiniment ; il semble résulter des dernières expériences qui ont été faites sur ce sujet que pour chaque aimant, il existe un maximum d'intensité magnétique qu'on ne peut dépasser ; de là résultera qu'en approchant de cette limite, on ne verra pas à chaque augmentation de courant, correspondre une augmentation correspondante de magnétisme, mais que cette dernière ira en diminuant pour devenir nulle quand le courant sera infini.

est un anneau plat de largeur, un peu plus grande que le vide existant entre le manchon et le noyau ou que l'épaisseur de la bobine.

Ici se présentent ces questions : quelles doivent être la nature, la forme et les dimensions des noyaux ? Pour les résoudre examinons les diverses circonstances de l'aimantation. Presque tous les corps, si on admet la théorie de M. Edmond Becquerel, sont susceptibles d'éprouver l'action magnétique, c'est-à-dire sont magnétisables ; mais cette propriété, presque nulle chez la presque totalité des corps, est assez faible sur quatre ou cinq d'entre eux et n'a de valeur notable que dans le fer, le nickel et le cobalt. Comme on peut toujours diminuer le magnétisme par l'affaiblissement du courant magnétisant, il est clair que, toutes choses égales d'ailleurs, il est préférable d'employer les corps jouissant au plus haut degré de la propriété d'être magnétisables. Les corps qui ont été aimantés assez fortement ne perdent pas immédiatement tout leur magnétisme après que la cause magnétisante a cessé d'agir : ainsi un morceau d'acier aimanté conserve dans ce cas presque tout le magnétisme qu'il avait acquis ; il en est de même de l'oxyde de fer connu sous le nom d'oxyde magnétique. D'autres en conservent beaucoup moins, et tous les corps susceptibles d'être aimantés d'une manière notable jouissent de cette propriété quand ils ne sont pas purs ou quand leurs molécules ont entre elles un arrangement déterminé ; cette propriété s'appelle force coercitive. On admet que pour s'aimanter, un corps magnétisable doit avoir ses molécules disposées d'une façon particulière et qu'elles reprennent leur position primitive quand l'aimantation cesse ; on suppose que les corps qui ont une force coercitive ont un arrangement tel que les molécules ne peuvent se mouvoir facilement, et que cette inertie qui s'oppose à la désaimantation doit s'opposer à l'aiman-

tation ; ce qui a lieu en effet, car les corps jouissant de cette propriété s'aimantant aussi difficilement qu'ils se désaimantent. Le magnétisme qui reste après que l'on a cessé d'aimanter un corps s'appelle magnétisme remanant.

L'intensité du magnétisme remanant est de beaucoup augmentée par la présence de l'armature mobile. Ainsi, M. Watkins a observé qu'un électro-aimant qui retenait son armature avec une force de 120 livres anglaises, continuait à la retenir avec une force de 50 livres quand le courant eut cessé d'agir ; mais après avoir arraché violemment cette armature, l'aimant ne conservait plus aucune trace sensible d'aimantation. Le même fait se reproduisit par tout autre procédé employé pour produire l'aimantation. Il y a pour ainsi dire un circuit magnétique formé par l'intermédiaire de l'armature ; le magnétisme du fer réagit sur lui-même, s'exalte ainsi et s'oppose d'autant plus efficacement au retour des molécules à leur position primitive. Les courants d'induction développés par la présence de l'armature sont de même sens que ceux produits par l'augmentation ou la naissance du magnétisme inducteur, et confirment ainsi la croyance à l'augmentation de magnétisme produite par la présence de l'armature, hypothèse que d'autres considérations avaient conduit à former. La durée de la présence de l'armature agit comme l'excès de magnétisme en déterminant un magnétisme remanant d'autant plus fort que l'un ou l'autre ont été plus considérable.

Cette propriété est très-fâcheuse pour les télégraphes et doit être évitée autant que possible, même aux dépens de l'intensité magnétique, mais seulement à un faible degré, car dans la télégraphie la force magnétisante est en générale très-faible. Du reste, le choix n'offre pas d'embarras, car tous les corps les plus magnétisables ne présentent pas cet inconvénient à un plus haut degré que les autres, excepté l'acier. Ainsi le fer pur, le

cobalt et le nickel peuvent être pris indifféremment. La préférence que l'on supposait devoir accorder au nickel ne s'est pas montrée à tous les expérimentateurs et tenait peut-être à son degré de pureté et à l'état moléculaire dans lequel se trouvait le métal dans les mains de ceux qui le préconisaient. Il faut donc prendre l'un de ces trois métaux, mais aussi pur que possible ; on doit évidemment accorder la préférence au fer, qui est infinitéimement plus commun et moins cher que les autres. Ainsi on doit, par raison de qualité ou d'économie, employer le fer, mais aussi pur que possible ; toutefois cette condition n'est pas la seule qu'il doive remplir, car M. Mathiessen, en Angleterre, a fait des expériences desquelles il résulte que la pureté du fer ne suffit pas pour lui enlever tout son magnétisme remanant, tout son pouvoir coercitif. Ayant, en effet, au moyen d'un courant électrique, extrait du fer d'un sel ferrugineux chimiquement pur, il obtint avec ce métal ainsi déposé et non travaillé mécaniquement, un aimant temporaire qui conservait un magnétisme remanant considérable après que le courant magnétisant eut cessé d'agir. On voit ainsi que l'état moléculaire du fer employé a une influence sur la force coercitive de l'aimant qu'il formera.

Nous allons chercher maintenant quelles sont les conditions moléculaires les plus favorables pour que le fer ait le moins possible de force coercitive. Bien des raisons portent à croire que la cause de l'aimantation est un déplacement, ou plutôt une orientation des molécules du corps aimanté. Ainsi, un fil tendu que l'on aimante et désaimante rapidement rend un son, et l'on sait que le son est dû aux vibrations des molécules du corps sonore. Une verge de fer fixée horizontalement par une de ses extrémités est infléchie au moyen d'un petit poids fixé à son extrémité libre ; elle se redresse sous l'influence de l'aimantation

et s'infléchit de nouveau quand cette influence vient à cesser. Une barre de fer doux s'allonge d'environ $\frac{1}{720,000}$ de sa longueur par l'effet d'un courant d'une certaine intensité. Pour des fils tendus au moyen d'un poids et ayant 32 centimètres de longueur pour 5 millimètres de diamètre, l'allongement a lieu tant que la tension ne dépasse pas 350 kilog.; à cette limite, il n'y a ni allongement ni raccourcissement, mais au delà il y a raccourcissement. Cela se conçoit facilement en admettant l'orientation moléculaire; cette orientation exige souvent une plus grande place pour chaque molécule, comme cela a lieu dans la cristallisation de la glace, puisque l'eau en gelant, c'est-à-dire en orientant ses molécules pour la cristallisation, augmente de volume, devient plus légère et surnage. Mais si le fil a éprouvé, par suite de la tension, une dilatation dans le sens de la longueur plus grande que celle que lui aurait imprimée l'orientation moléculaire, ce mouvement peut avoir lieu sans extension du corps dans le sens de la longueur; mais aussi, après qu'il a eu lieu, les molécules peuvent se trouver plus rapprochées dans ce sens et l'attraction moléculaire devenir plus considérable, ce qui tend à raccourcir le fil.

Il est donc bien clair que dans l'aimantation se produit un mouvement d'orientation des molécules; par suite tout ce qui donnera de la mobilité aux molécules favorisera l'aimantation et la désaimantation, et au contraire tout ce qui diminuera cette mobilité empêchera ces deux actions contraires et communiquera au corps cette espèce d'inertie que nous avons désignée sous le nom de force coercitive. De plus, comme l'aimantation paraît résider principalement à la surface des corps, puisqu'on a trouvé qu'un aimant creux et un aimant plein jouissaient du même pouvoir magnétique pour un courant donné, il en ré-

sulte que c'est principalement à la surface du corps que cette immobilité moléculaire a le plus d'importance. Le martelage, le passage à la filière, la trempe, durcissent la surface des métaux en rapprochant les molécules et en diminuant par cela même leur mobilité; ces opérations communiqueraient donc au fer de la force coercitive; c'est ce qu'on observe en effet. De même un choc en agitant les molécules permet à l'aimantation de se faire plus facilement, si la force magnétisante agit pendant le choc; un choc peut également détruire le magnétisme rémanant. Il faut donc éviter les chocs dans les appareils télégraphiques. On a également observé qu'un courant très-fort passant alternativement pendant un temps très-court dans les deux sens, rendait un électro-aimant susceptible de s'aimanter également bien dans les deux sens. Au commencement de l'établissement des lignes télégraphiques, c'était ainsi que l'on détruisait, au moins pour un temps, la force coercitive qu'avaient les aimants de nos appareils, par suite de la mauvaise qualité du fer et de la manière défectueuse dont ils étaient travaillés.

Dans la construction des aimants, il faut employer les fers les plus purs et les mieux travaillés: les fers au bois doivent être seuls employés; les fers à la houille, au coke, à l'anthracite doivent être exclus. On commence par donner au fer, en le soumettant à la forge, une forme approchée de celle qu'il doit définitivement avoir, puis on le fait recuire avec soin en le mettant dans de l'oxyde de fer. Cet oxyde a pour but de brûler, au moyen de son oxygène, le carbone qui serait combiné au fer; cette opération se fait par cémentation, c'est-à-dire que le fer se substitue peu à peu au carbone en éliminant celui-ci du dehors au dedans. On dégrossit alors peu à peu le fer en n'attaquant que lentement la surface, afin d'ébranler le moins possible les molécules du fer, puis on fait recuire, toujours dans

l'oxyde; on reprend le dégrossissage, on recuit, et on continue ainsi en allant de plus en plus doucement jusqu'à ce que le fer ait pris la forme voulue.

La forme et la dimension des électro-aimants influent d'une manière notable et sur la quantité de magnétisme qu'un courant donné est susceptible de communiquer au fer et sur le magnétisme remanant que la cessation du courant peut lui laisser. Plus la masse de fer est considérable et plus, pour un courant donné, il sera, en général, susceptible d'acquérir d'aimantation, mais aussi plus il conservera de magnétisme remanant; il n'y a donc pas toujours avantage à augmenter le volume des aimants. Prenons quelques exemples: M. Nicklès voulut essayer l'influence de la longueur des fers droits sur leur aimantation; il introduisit ^{un} tel fer dans sa bobine, le mit verticalement et suspendit à son extrémité inférieure un armature de poids telle qu'elle puisse être attirée, mais sans rester suspendue; en posant sur la partie supérieure de l'aimant un prolongement en fer, l'armature était immédiatement attirée et ne retombait plus. Pour avoir des résultats numériques, voici comment ce physicien conduisit l'expérience: il prit pour noyau de sa bobine des cylindres de fer ayant 0^m,110 de longueur et plaça en dessus successivement trois cylindres de même diamètre et ayant les longueurs suivantes:

N ^o s 1,	longueur	0 ^m ,050
2,	—	0 ^m ,100
3,	—	0 ^m ,110

L'hélice, composée de 94 mètres de fil de 1 millimètre de diamètre, avait 754 tours de spire. L'armature était également ^{un} cylindre; elle pesait 74 grammes, et on avait eu soin d'arrondir la partie en contact avec l'aimant. Deux courants furent successi-

vement employés ; l'un marquait à la boussole des tangentes $11^{\circ} 30'$, l'autre $7^{\circ} 15'$. On obtint les résultats suivants :

Avec le courant de $11^{\circ} 30'$.

Sans allongement, l'aimant porte d'emblée	1,700 gr.,	et tombe avec	1,750
Avec le n° 1,	—	—	1,900 gr.,
Avec le n° 2,	—	—	2,000 gr.,
Avec le n° 3,	—	—	2,150 gr.,

Avec le courant de $7^{\circ} 15'$.

Sans allongement, l'aimant porte d'emblée	980 gr.,	et tombe avec	1,000
Avec le n° 1,	—	—	1,100 gr.,
Avec le n° 2,	—	—	1,210 gr.,
Avec le n° 3,	—	—	1,260 gr.,

On voit par ce tableau l'influence de l'allongement du barreau aimanté sur l'attraction magnétique ; elle a néanmoins une limite à partir de laquelle l'allongement diminue l'attraction au lieu de l'augmenter.

Ce que nous venons de dire des aimants droits a également lieu pour les aimants en fer à cheval, dont une seule branche est armée de sa bobine ; mais pour ceux dont les deux branches sont armées de bobines, la longueur des branches, les bobines restant les mêmes, n'a aucune influence sur l'aimantation. L'aimant à trois branches, dont une seule est armée, se comporte comme l'aimant à deux branches qui se trouve dans le même cas. Mais si on peut ainsi, dans quelques cas, augmenter la force attractive que procure un courant donné, on augmente le magnétisme rémanant, et en télégraphie ce dernier inconvénient dépasse de beaucoup l'avantage que produisait une augmentation de force attractive. Nous devons donc nous en tenir aux électro-

aimants en fer à cheval, dont les branches doivent dépasser le moins possible les bobines. Il est clair que, s'il était possible, l'aimant devrait se composer d'une seule barre recourbée en U, mais cette disposition ne serait commode ni pour la fabrication ni pour l'agencement de cette pièce dans les appareils; il vaut mieux lui donner la forme d'un II dont la traverse est reliée aux branches au moyen de vis. La section de cette traverse doit être suffisamment grande pour ne pas diminuer le magnétisme du fer et permettre la libre transmission des actions magnétiques d'une branche à l'autre; il faut pour cela que sa section soit à peu près égale à celle des branches.

Nous avons dit que les électro-aimants étaient entourés d'un fil conducteur recouvert de fil; quand ce fil est traversé par un courant le fer s'aimante; la position des pôles dépend de la position de la bobine par rapport au fer. Le pôle est le point d'application de la résultante des forces développées dans l'aimant et la force attractive de l'aimant sur son armature est une fonction de l'inverse de la distance au pôle dont la valeur est à partir d'un certain point très-rapidement croissante. Il est donc utile pour que la force attractive soit aussi considérable que possible que les pôles soient très-rapprochés de l'extrémité des branches. Cette condition est encore nécessitée par une autre considération: quand l'armature s'approche de l'électro-aimant, elle réagit sur ce dernier et en attire le pôle de manière à le rapprocher de l'extrémité de la branche; enfin, au contact ce pôle se trouve à l'extrémité même de la branche, où il est neutralisé par le pôle contraire de l'armature. On voit donc que pendant le mouvement de l'armature les pôles se déplacent, et que ce travail exige une force d'autant plus considérable que l'espace parcouru est lui-même plus étendu. Le moyen de rapprocher les pôles de leur extrémité c'est de faire en sorte que

le fer ne dépasse que peu la bobine, ou mieux encore, si cela est possible, que la bobine dépasse le fer.

L'aimantation que la bobine procure au fer quand elle est traversée par un courant, est proportionnelle au nombre de tours et à l'intensité du courant. On peut donc se demander, pour une bobine donnée, quelle doit être l'épaisseur du fil qui lui servira d'enveloppe pour que son action magnétisante soit maximum, car le nombre de tours de fil et par suite d'intensité de l'action varie en raison inverse de la section du fil, tandis que la résistance au courant est proportionnelle à cette même section. Ce sont donc deux causes agissant en sens inverse et suivant des lois différentes, ce qui permet de rechercher les relations qui doivent exister entre elles pour que le résultat soit le plus favorable possible. Le même calcul que nous avons fait pour les galvanomètres pourrait se répéter ici; mais dans ce calcul on n'a pas tenu compte de la rondeur des fils, ce qui fait qu'*à priori* on ne peut dire que le résultat obtenu soit exact dans ce cas.

Soit h la hauteur de la bobine.

e l'épaisseur de la couche de fil.

$2r$ le diamètre du fer doux.

x le diamètre du fil, enveloppe comprise.

ρ le coefficient de résistance du fil de la bobine,
épaisseur de l'enveloppe comprise et supposée
proportionnelle au diamètre du fil.

E la force électro-motrice de la pile.

R la résistance de la pile et de la ligne.

R' celle de l'électro-aimant.

La longueur de la première couche de fil est :

$$2\pi \frac{h}{x} \left(r + \frac{1}{2}x \right)$$

Celle de la dernière couche se trouve être

$$2 \pi \frac{h}{x} \left(r + e - \frac{1}{2} x \right)$$

Les couches intermédiaires croissent en progression arithmétique dont la raison est

$$2 \pi \frac{h}{x} \left(x \right)$$

Le nombre total des couches est

$$\frac{a}{x}.$$

La sommation de la progression arithmétique donnera pour la longueur totale du fil

$$\pi \frac{h}{x} \left(2 r + e \right) \frac{e}{x}$$

Sa résistance totale proportionnelle à sa longueur, à son coefficient de résistance et en raison inverse de la section $\frac{\pi x^2}{4}$ (en supposant l'épaisseur de la couche isolante proportionnelle au diamètre du fil) sera donc

$$R' = 4 \rho h (2 r + e) \frac{e}{x^4}$$

Posant $\frac{1}{x} = y$, on aura

$$R' = 4 \rho h e y^4 (2 r + e) = K h e y^4$$

en posant $K = 4 \rho (2 r + e)$.

La force magnétisante de la bobine est proportionnelle à la force électro-motrice E , au nombre de tours $\frac{h \cdot e}{x^2} = e \cdot h \cdot y^2$ et en raison inverse de la résistance totale $R + R'$; elle est donc

$$F = \frac{E \cdot h \cdot e \cdot y^2}{R + K \cdot h \cdot e \cdot y^4}$$

Pour que cette quantité soit la plus grande possible, on prend la dérivée qu'on égale à zéro; nous ne ferons pas ce calcul et nous dirons de suite que l'équation résultante est

$$2(R + K \cdot h \cdot e \cdot y^4) \cdot E \cdot h \cdot e \cdot y - 4 \cdot E \cdot h \cdot e \cdot y^2 \cdot K \cdot h \cdot e \cdot y^3 = 0$$

Ou en réduisant

$$R = K \cdot h \cdot e \cdot y^4 = R'$$

c'est-à-dire que la résistance du fil doit être égale à la résistance de la ligne, ce qu'on aurait également trouvé en ne tenant pas compte de la rondeur du fil.

Nous avons supposé que l'épaisseur de la couche isolante qui recouvre le fil était proportionnelle au diamètre du fil, d'où résultait que le rapport des sections du fil recouvert et du fil nu restait constant, et que, par conséquent, la conductibilité du fil recouvert était pour la même section une fraction constante de la conductibilité du fil nu. C'est ce qui nous avait permis de représenter cette conductibilité par $\frac{s \cdot \pi \cdot x^2}{2}$, s étant une frac-

tion constante de la conductibilité du métal. Il n'en est pas ainsi, comme le fait voir le tableau suivant :

N° du fil.	Diamètre nu.	Diamètre recouvert.	Rapport des sections
	mm.	mm.	
P	0.58	0.77	0.56
12	0.49	0.65	0.56
16	0.40	0.55	0.53
20	0.35	0.48	0.53
24	0.27	0.40	0.45
28	0.22	0.33	0.44
32	0.14	0.23	0.36

Il est donc certain que le calcul que nous avons indiqué précédemment n'est pas mathématiquement exact; néanmoins si nous examinons la nature des *maxima*, nous verrons qu'on peut au moins provisoirement s'en servir, si l'on n'a pas à tenir compte des phénomènes d'induction des lignes sous-marines, et de charge et décharge des lignes aériennes, phénomènes dont nous avons précédemment parlé. En effet, à moins de circonstances particulières, la courbe qui représente une liaison ou fonction quelconque entre deux quantités variables, n'a pas de changements brusques de direction; ce changement se fait d'une manière insensible d'un point à l'autre. Dans ce cas, la fonction considérée n'atteint son maximum qu'insensiblement, et pour les points voisins elle a une valeur à peu près égale à celle qu'elle avait au point maximum. Ainsi sur le sommet d'une montagne arrondie comme certains ballons des Vosges, le point culminant diffère peu en élévation des points voisins; il y a au sommet une espèce de petit plateau dont tous les points pourraient sans erreur sensible être pris pour le point culminant de la montagne. Il ne faut donc pas s'en tenir strictement aux valeurs qui donnent mathématiquement les maxima, mais on peut, suivant

la nécessité, s'en écarter en plus ou en moins sans modification sensible de la valeur qu'on veut rendre maxima. Comme, en passant d'un fil à un fil dont le diamètre différerait très-peu, le rapport des sections du fil recouvert et du fil non recouvert changerait également très-peu, il en résulterait que le maximum mathématique changerait lui-même très-peu ; nous pouvons donc sans erreur sensible adopter dans la pratique les résultats donnés par la théorie précédente.

Examinons maintenant pour quelle longueur de ligne chacun des fils du commerce donnerait le maximum d'effet : avec les bobines employées habituellement, il suffit de calculer la résistance de chaque fil. Appelons s le rapport des sections du fil recouvert et du fil non recouvert donné par le tableau précédent. On aura pour la valeur de ρ , c'est-à-dire pour la résistance du fil sur l'unité de longueur

$$\rho = \frac{(0.004)^2}{6 s}$$

en prenant pour unité de résistance le kilomètre du fil de fer de 4 millimètres de diamètre, et en admettant que le cuivre est six fois plus conducteur que le fer,

$$R = k h e y^4 = \frac{4 \rho (2r + e) h e}{x^4}$$

$$\text{d'où } R = \frac{4 h e (0.004)^2 (2r + e)}{6 s \cdot x^4}$$

$\frac{h}{x}$ c'est le nombre de tours que renferme chaque couche de fil.

$\frac{e}{x}$ c'est le nombre de couches.

Si nous appelons N le nombre total, on aura :

$$N = \frac{h}{x} \times \frac{e}{x}$$

Dans les bobines des appareils de l'administration

$$h = 0.120 \quad e = 0.012 \quad r = 0.006,$$

$$\text{On a donc } R = 0.000 \ 001 \ 396 \times \frac{1}{s \ x^4}$$

De là on tire :

Pour le fil n° P, $x = 0.00077$

$$\frac{h}{x} = 156, \quad \frac{e}{x} = 15$$

$$N = 156 \times 15 = 2340$$

$$R = 1,476 \text{ mètres.}$$

Pour le fil n° 12 $x = 0.00065$

$$\frac{h}{x} = 184, \quad \frac{e}{x} = 18$$

$$N = 184 \times 18 = 3312$$

$$R = 2,856 \text{ mètres.}$$

Pour le fil n° 16 $x = 0.00055$

$$\frac{h}{x} = 218, \quad \frac{e}{x} = 22$$

$$N = 218 \times 22 = 4796$$

$$R = 5,949 \text{ mètres.}$$

:

Pour le fil n° 20 $x = 0.00048$

$$\frac{h}{x} = 250, \frac{e}{x} = 25$$

$$N = 250 \times 25 = 6250$$

$$R = 10,290 \text{ mètres.}$$

Pour le fil n° 24 $x = 0.00040$

$$\frac{h}{x} = 300, \frac{e}{x} = 30$$

$$N = 9000$$

$$R = 25,103 \text{ mètres.}$$

Pour le fil n° 28 $x = 0.00033$

$$\frac{h}{x} = 364, \frac{e}{x} = 36$$

$$N = 13,104$$

$$R = 55,709 \text{ mètres.}$$

Pour le fil n° 32 $x = 0.00023$

$$\frac{h}{x} = 522, \frac{e}{x} = 52$$

$$N = 522 \times 52 = 27,144$$

$$R = 287,900 \text{ mètres.}$$

Le fil n° 32 étant le plus fin qu'on trouve dans le commerce, on voit qu'on ne peut dépasser 300 kilomètres de résistance, quantité du reste parfaitement suffisante. Les nombres que nous venons de donner pour le nombre de tours susceptibles d'être enroulés sur une bobine, sont des nombres théoriques, car il

est impossible d'enrouler du fil avec assez de régularité pour que les spires se touchent, et par conséquent il est impossible d'en obtenir autant que l'indique la théorie. L'administration emploie deux espèces de bobines : les unes sont faites en fil n° 16 ; elles ont 24 couches de 109 spires chacune, soit environ 2,600 tours ; leur résistance varie entre 2,500 mètres et 3,500 mètres, ce qui tient aux variations de grosseur du fil du même numéro ; on a ainsi, pour l'électro-aimant complet, 5,200 tours et une résistance de 5,000 à 7,000 mètres. Les bobines de grande résistance sont en fil n° 32, elles ont 42 couches de 260 spires chacune, ce qui fait environ 10,900 tours, ayant une résistance de 100 à 120 kilomètres. Cette variation de résistance des bobines a déterminé l'administration à n'accoupler que des bobines ayant à peu près la même résistance, de manière à avoir des électro-aimants de résistances différentes. On a ainsi obtenu, en employant d'anciennes bobines, les unes un peu plus grosses, les autres un peu plus faibles que le modèle actuellement adopté, des aimants dont la résistance varie de 150 à 300 kilomètres que l'on emploie sur les lignes ayant à peu près la même résistance, de manière à se conformer approximativement aux résultats théoriques trouvés précédemment.

Nous devons toutefois rappeler ici une observation que nous avons déjà faite, c'est que le calcul est fait pour le cas d'une action permanente de l'électro-aimant, et que les conditions changent complètement si, comme c'est le cas pour les lignes télégraphiques, il y a des interruptions de courant ; dans ce cas il faut tenir compte de la loi de la charge et de la décharge du fil, à moins que le fil conducteur ne soit en l'air et n'ait pas une longueur et un volume trop considérables.

Nous avons dit que dans les appareils télégraphiques les signaux étaient déterminés par les alternatives d'établissement

et d'interruption du courant ou par son renversement. Nous avons vu comment on percevait ces changements au moyen d'aiguilles aimantées, influencées par un courant, soit qu'il agisse directement, soit au moyen d'aimant. Quand on veut avoir une force un peu considérable, l'aimant doit être exclusivement employé et doit agir sur une armature mobile, c'est-à-dire sur une pièce de fer ou d'acier qu'elle attire ; dans le cas de l'acier, l'armature doit être un aimant permanent. Quand on veut faire cesser le rapprochement de l'armature, il suffit, dans le dernier cas, de renverser le courant. Nous étudierons ce système un peu plus loin. Mais si l'on se sert d'une armature en fer, il faut de toute nécessité avoir un ressort qui tende sans cesse à éloigner l'armature de son électro-aimant et que surmonte l'attraction de ce dernier quand il est aimanté par un courant. On voit que, dans ce cas, une partie de la force produite par l'aimantation est employée à tendre le ressort, et que le reste seulement sert à attirer l'armature ; quand l'aimantation cesse, la force emmagasinée par la tension du ressort réagit contre la plaque et la ramène à sa position primitive.

Etudions maintenant l'action de ces deux forces destinées à agir alternativement sur l'armature. L'attraction produite par l'aimantation est une fonction assez complexe et peu connue de la distance de l'armature aux pôles de l'aimant ; en tout cas, elle varie énormément avec cette distance : énorme et peut-être infinie, quand cette dernière devient nulle, elle devient très-faible avec une faible distance. Ainsi une armature qui, au contact de l'aimant (ce qui ne veut pas dire en contact avec les pôles), supportait 10 kilog., ne supportait plus que 1 gramme à quelques millimètres. On voit donc que la force attractive pendant le rapprochement de la palette est croissante et énormément variable ; par suite, le mouvement de cette pièce est

lui-même extrêmement variable. On conçoit qu'il est utile que le mouvement de l'armature ait une durée aussi faible que possible ; malheureusement la variation n'a pas lieu dans un sens favorable à la brièveté de ce temps. On sait que lorsqu'une force permanente agit sur un corps, le corps acquiert à chaque instant une vitesse qui s'ajoute à la vitesse précédemment acquise, d'où résulte que quand même la force est constante, le mouvement s'accélère ; le calcul indique que la vitesse acquise est proportionnelle au carré du temps, l'expérience confirme ce résultat. De là résulte que si la force s'accélère, la vitesse elle-même va, à bien plus forte raison, en s'accélérant, et la force acquise ne fait sentir son effet que vers la fin du mouvement, et, par suite, ne concourt à l'accroissement de vitesse que pendant un temps très-court. Si, au contraire, la quantité de force dont on dispose dans l'espace à parcourir était plus uniformément répartie, elle accélérerait plus fortement le mouvement dès le commencement, et le temps mis à parcourir l'espace en question serait bien moindre.

Le ressort, tant qu'on ne dépasse pas la limite d'élasticité, exige pour se tendre une force proportionnelle à la déformation ; de là résulte que la force de rappel est en chaque point proportionnelle à la déformation ; elle n'est donc pas constante et est plus forte au commencement du mouvement rétrograde qu'à la fin, ce qui est tout à fait favorable à la rapidité du mouvement. Cette augmentation de la force de rappel entre les points extrêmes de la course de l'armature est d'autant moindre que le ressort est plus tendu à l'état de repos. En effet, une quantité à laquelle on a ajouté une autre quantité est d'autant moins modifiée par cette dernière qu'elle-même a une plus grande valeur. Cette variation de la force du ressort est en outre favorable à l'action de l'aimant, car leur moindre intensité a lieu ainsi pour

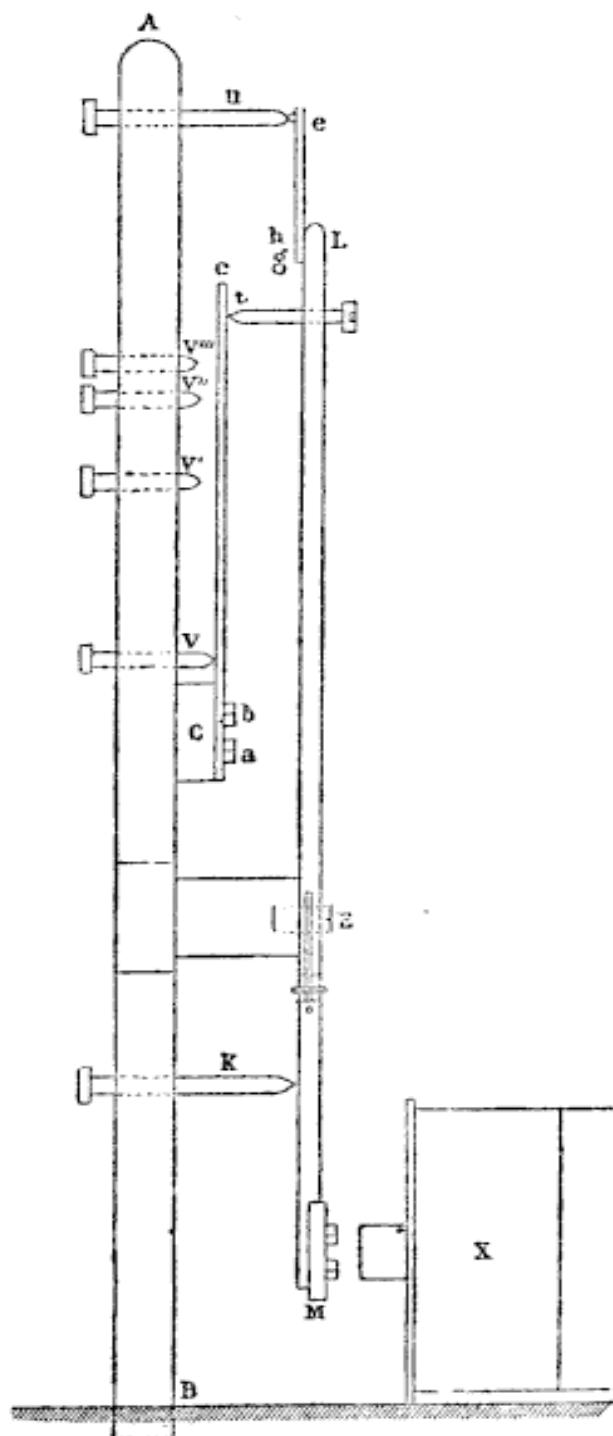
les mêmes points du trajet de l'armature. Toutefois la variation est beaucoup plus faible dans le ressort que dans l'attraction par le magnétisme, ce qui présente quelques inconvénients. Si le fer, ce qui a presque toujours lieu, garde après le passage du courant une certaine quantité de magnétisme rémanant, il faut que le ressort soit suffisamment tendu pour vaincre cette action anormale ; mais alors il peut le devenir trop pour que l'action du magnétisme, affaiblie par la distance, puisse le surmonter à son tour au moment du rétablissement du courant. Deux dispositions concourent à atténuer cet effet : la première consiste à éloigner l'électro-aimant de l'armature autant qu'il est possible de le faire sans trop diminuer la force attractive ; la seconde, à se servir de ressorts courts qui se déforment fortement pour un petit mouvement de la palette, et à qui leur élasticité permette de reprendre exactement leur forme primitive lorsque la cause qui a produit la déformation vient à cesser. Nous avons dit que la force attractive des aimants sur leur armature variait énormément avec la distance, et cette variation devient d'autant plus grande que la distance devient plus faible ; il y a donc avantage à maintenir une certaine distance entre ces deux pièces au moment du plus grand rapprochement. On a, en outre, par cette précaution, l'avantage de diminuer le magnétisme rémanant conservé par la présence de l'armature près des pôles de l'aimant. Quant au ressort, plus il est court et plus un faible allongement produira de déformation, par conséquent plus il y aura de réaction de la part du ressort quand l'effort qui le tend vient à cesser et que son allongement aura atteint le maximum qu'il doit avoir.

Les ressorts habituellement employés sont des ressorts à boudin, c'est-à-dire qu'ils sont composés d'un fil métallique, le plus souvent en cuivre, que l'on roule en hélice autour d'un cylin-

dre ; la limite d'élasticité est dépassée, un nouvel arrangement moléculaire s'établit dans le fil, qui conserve en partie la forme qui leur a été donnée. Ces ressorts se déforment très-facilement par un léger excès de tension ; il serait préférable d'employer des fils d'acier recuits, puis contournés en hélice et retremplés, afin de leur rendre toute leur élasticité.

M. Callaude, de Nantes, afin de faire concorder la force du ressort avec celle de l'aimant en opposition de laquelle elle agit, s'est servi d'un ressort dont la longueur varie avec la flexion. Ce ressort est une lame d'acier droite, fixée par une de ses extrémités et venant par l'autre s'appuyer contre la palette qu'elle tend à écarter de l'électro-aimant. On conçoit que si, pendant la flexion du ressort le point fixe se rapproche de plus en plus de l'extrémité libre, le ressort diminuera de longueur, et, par conséquent, résistera plus fortement à l'appel de l'électro-aimant, et cela précisément à mesure que cette force elle-même deviendra plus considérable. Pour arriver à ce résultat, M. Callaude avait disposé, sur le parcours du ressort, des vis dont les pointes pouvaient être plus ou moins rapprochées du ressort ; il faisait en sorte que ces pointes fussent d'autant plus rapprochées du ressort qu'elles étaient plus éloignées de l'extrémité libre, de manière à être rencontrées successivement par le ressort de sa flexion. Chaque pointe rencontrée déterminait la fixité du point du ressort qui s'appliquait contre elle, et, par conséquent, diminuait la longueur de cette pièce. On conçoit qu'on pouvait régler les vis de manière que la longueur du ressort variait comme la force qu'il devait contrebalancer. Néanmoins, cette disposition n'a pas été appliquée ; il fallait, pour avoir une disposition praticable que le ressort eût une flexion de dimension notable, ce qui exigeait un mouvement assez grand de l'armature : aussi était-on obligé d'employer un courant d'une intensité assez

FIGURE 62.

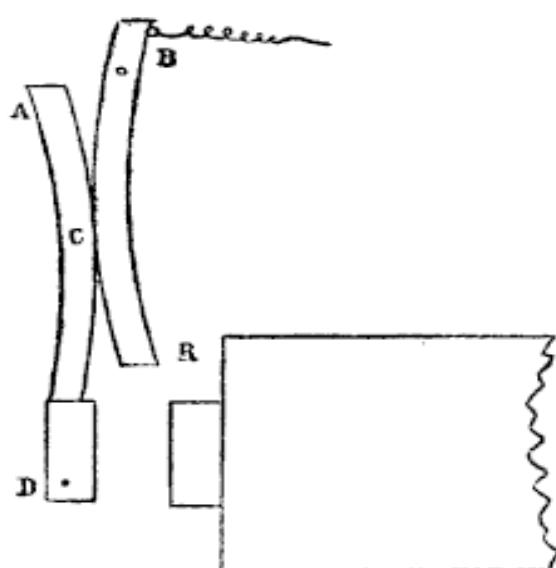


grande. Néanmoins, c'était un moyen d'augmenter l'amplitude de la variation du courant entre les limites de laquelle l'appa-

reil pouvait fonctionner. Il est clair qu'au lieu de vis successives sur la pointe desquelles le ressort venait s'appliquer, on aurait pu le faire se courber sur une pièce solide taillée suivant une courbe.

M. Robert Houdin a résolu la question d'une autre façon : au lieu de faire varier la longueur du ressort, il a laissé cette lon-

FIGURE 63.

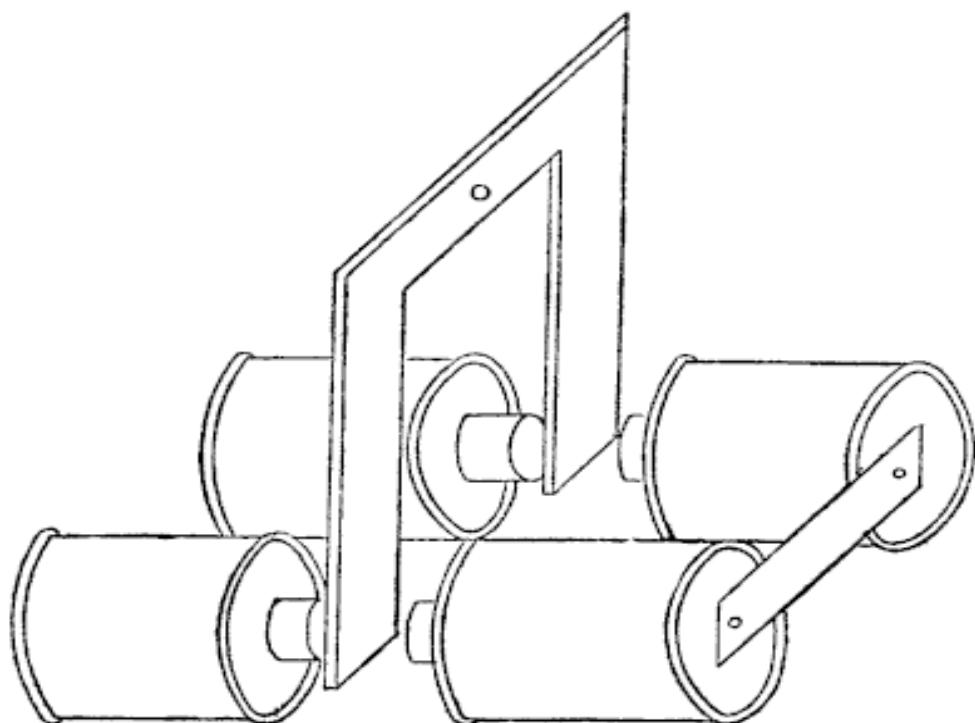


gueur fixe, mais en faisant varier la longueur des leviers que le ressort et l'armature mettent en mouvement. Au lieu d'appliquer l'armature et le ressort de rappel au même levier, il les a fixés à deux leviers courbes différents, de manière que, comme l'indique la figure (63), le levier du ressort de rappel A pressât contre le levier de l'armature A, de manière à éloigner cette pièce de l'électro-aimant. Les deux leviers en tournant autour de leurs points de rotation de B et D, avaient à cause de leur courbure, un point de tangence C variable : quand l'armature était rapprochée de l'électro-aimant, et par conséquent le res-

sort plus tendu, le point C était rapproché du point de rotation D, d'où le levier D C, très-petit et défavorable à l'action attractive de l'aimant, laquelle avait sa plus grande intensité ; le levier B C était au contraire très-long et favorable à l'action de rappel du ressort. Au contraire, quand l'armature était éloignée de l'électro-aimant, le point de contact C se rapprochait du centre de rotation du levier du ressort de rappel, le levier B C était très-court et défavorable au ressort de rappel, et le levier D C très-grand et par suite favorable à l'action attractive de l'aimant, action qui, par suite de la distance, était dans sa plus grande faiblesse.

Quoi qu'il en soit, il est toujours nécessaire de régler le ressort, c'est-à-dire de le tendre ou de le détendre quand le courant varie ; c'est un grave inconvénient quand les lignes ne sont pas en bon état : aussi la suppression du ressort est-elle un des *desiderata* de la télégraphie. Plusieurs moyens ont été proposés ; le premier en date est de M. Gloesner, qui a adopté la disposition suivante employée en Belgique (Voir la fig. 64, page suiv.). Un aimant permanent en acier, formé d'une lame en U, est suspendu par sa traverse entre deux pointes qui lui servent de pivot ; de chaque côté de cet aimant on a disposé deux électro-aimants, traversés tous deux par le courant de ligne ; quand le courant passe dans un sens, un des électro-aimants a ses pôles de même nom que ceux de l'aimant en regard desquels ils se trouvent, tandis que l'autre a ses pôles de nom contraire. Il en résulte que le premier attire l'armature aimantée, pendant que l'autre la repousse : l'inverse a lieu quand le courant change de sens. Dans cet appareil, les deux mouvements en sens contraire ne sont donc plus obtenus par la tension d'un ressort de rappel, mais par l'inversion du courant, ce qui complique le manipulateur et la manipulation.

FIGURE 64.



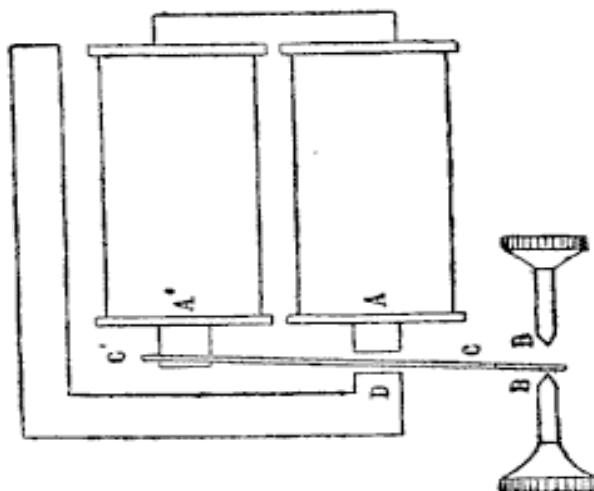
Il serait possible d'éviter cette inversion de courant au moyen de l'établissement et de l'interruption du courant de ligne. Il suffirait pour cela de recouvrir les bobines des deux électro-aimants de deux fils ; dans l'un passerait le courant de ligne, dans l'autre le courant d'une pile locale : ce dernier devrait être environ moitié du courant de ligne et lui être inverse, c'est-à-dire agir sur le fer inversement. Quand le courant de ligne passerait, il déterminerait dans les électro-aimants une aimantation moitié de celle qu'il donnerait seul, puisque son action est divisée de celle produite par le courant de la pile locale ; mais quand il cesse d'exister, le courant de cette dernière agit seul et l'aimantation change de sens.

Il faut avoir soin que les électro-aimants soient un peu éloignés de l'armature, quitte à ce que l'on soit obligé d'employer un courant un peu fort, car sans cela il y aurait grande prédomi-

nence d'action d'un des électro sur l'autre, et le magnétisme de l'aimant permanent pourrait être changé ou même inversé quand un courant atmosphérique violent et court traverserait le fil des électro-aimants. On sait que les courants engendrés par l'électricité statique ont une action toute spéciale pour modifier le magnétisme des aimants sur lesquels ils agissent.

Pour obvier à cet inconvénient, on a proposé de se servir d'une armature en fer doux rappelée par un aimant permanent; on évite en effet ainsi l'inconvénient de la désaimantation de l'aimant fixe, mais nous ne croyons pas qu'il y ait avantage sur le rappel par les ressorts; nous allons indiquer les diverses formes qui ont été adoptées. La figure (65) représente la disposition A et A', près

FIGURE 65.



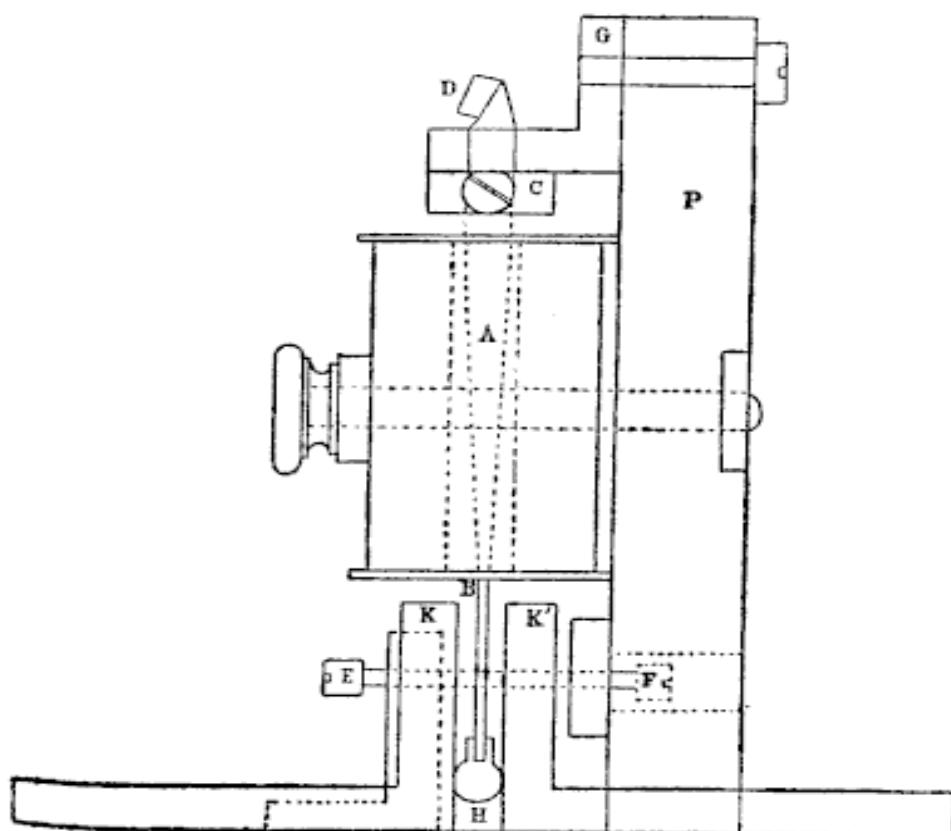
les bobines de l'électro-aimant; B et B' sont les vis qui limitent la course de l'armature C C'; D est l'extrémité de l'aimant permanent et fixe. L'armature et la vis B sont mises en relation avec les extrémités d'un circuit local dans lequel sont intercalés une pile et l'appareil récepteur à faire fonctionner, de

sorte que dès que l'armature est attirée, elle forme un circuit, c'est-à-dire un relai.

Quand un courant traverse le fil de l'électro-aimant, il l'aimante et détermine dans l'armature, au point C' un pôle de nom contraire au pôle de A', et en C un pôle de nom contraire à celui de A. Si ce courant est d'un sens tel que le pôle C soit de même nom que le pôle D de l'aimant fixe, ces deux pôles se repousseront, tandis que les pôles C et A s'attireront. Ces deux actions concourront donc à rapprocher l'armature de l'électro-aimant, tandis que le ressort de rappel agit en sens contraire de cette dernière pièce, d'où il résulte qu'un plus faible courant déterminera l'appel de l'armature. Quand le courant cesse, l'armature cesse d'être aimanté et l'aimant permanent l'attire comme tous les fers doux ; mais ici il n'y a plus avantage sur le ressort de rappel, il y a désavantage marqué : d'abord l'inconvénient de l'action à distance d'un aimant sur l'armature se retrouve ici ; en outre, s'il reste du magnétisme rémanant dans l'armature, ce que la disposition adoptée d'une armature articulée sur l'une des branches de l'électro-aimant favorise beaucoup, puisque le circuit magnétique formé par l'électro-aimant et son armature n'est interrompu qu'en un seul point entre C et A, il en résulte une grande tendance à déterminer dans le fer un équilibre magnétique tel que les molécules ont beaucoup de peine à reprendre leur position naturelle.

La seconde forme adoptée est représentée dans la fig. 66. On voit qu'ici c'est l'armature qui est mobile dans l'intérieur de la bobine de la seconde branche de l'électro-aimant. Elle sort d'une des branches de l'électro-aimant ; l'autre branche est en dehors et n'a pas de bobine. Quelques personnes donnent à ces électro-aimants un nom singulier : ils les appellent électro-aimants

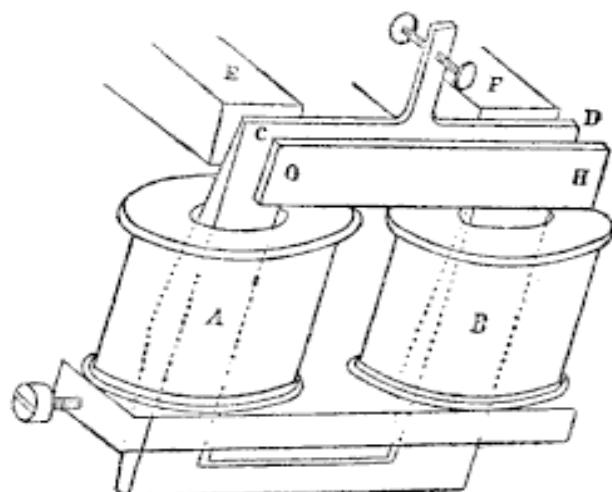
FIGURE 66.



boiteux. Nous préférions en donner la description en quelques mots, sans les désigner par un nom particulier. On s'en sert rarement, et leur forme varie nécessairement beaucoup avec leur emploi. Toutefois, dans cette nouvelle disposition, si l'on a soin de faire en sorte que l'extrémité B de l'armature dépasse peu la bobine, on évite en grande partie un inconvénient que peut présenter la première disposition, c'est-à-dire la non-répulsion de l'armature par l'électro-aimant fixe et l'établissement d'un point conséquent. Quand une tige de fer est sollicitée à ses deux extrémités par des pôles de même nature, il se forme à ses extrémités des pôles contraires aux premiers, mais semblables entre eux ; mais comme un corps ne peut jouir d'un seul des deux magnétismes, puisqu'on obtiendrait ainsi le mouvement

perpétuel, c'est-à-dire une force infinie, il s'établira donc un ou plusieurs pôles de noms contraires à ceux des extrémités et situés entre eux. Dans ce cas, on voit que le fer sera attiré par les deux pôles qui agissent sur lui. Pour que ce cas ne se présente pas, il faut que l'un des deux pôles inducteurs soit très prédominant en intensité sur l'autre, ce qui peut être le cas pour l'appareil dont nous parlons; mais même dans ce cas, cette tendance à l'établissement d'un pôle intermédiaire, qu'on appelle point conséquent, s'oppose à une répulsion franche et nette comme on devrait l'obtenir. En entourant l'armature d'une bobine, comme le fait voir la seconde disposition indiquée et en faisant en sorte qu'elle dépasse peu la bobine, on évite cette formation d'un point conséquent. Toutefois elle présente un double inconvénient, à savoir peu de place pour l'enroulement du fil et grande masse de fer en dehors de la bobine. Nous avons vu qu'il fallait réduire cette masse autant que possible.

FIGURE 67.

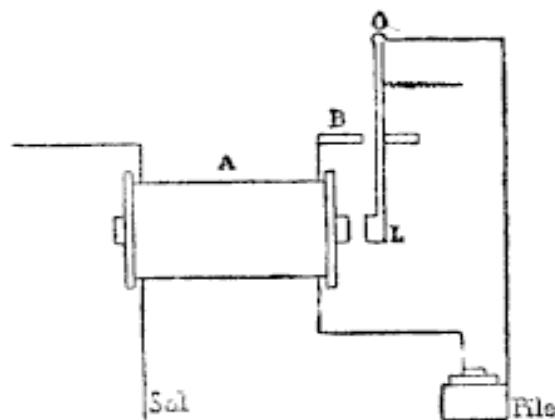


La figure 67 représente une troisième disposition dans laquelle les deux branches sont mobiles séparément ou dans les creux de deux bobines; elles peuvent également, comme l'indi-

que la figure, être reliées entre elles par une légère armature dont l'effet est complété par une pièce de fer qui relie les deux bobines. Chaque branche de l'électro-aimant est attirée par un des pôles d'un aimant fixe, quand le courant ne passe pas ; quand le courant passe dans un sens déterminé, ces branches sont repoussées par l'aimant fixe et attirées par une pièce de fer qui est placée de l'autre côté de cet aimant. Nous croyons cette dernière disposition moins bonne que la première, un courant atmosphérique très-énergique devant agir avec toute sa puissance pour modifier le magnétisme de l'aimant permanent.

M. Jules Quéval a suivi une autre marche pour résoudre la question du réglage des ressorts : pour détruire le magnétisme rémanent, il fait passer pendant un temps excessivement court un courant qui tend à donner une aimantation contraire à ce magnétisme. Voici la forme qu'il donne aux récepteurs simples et aux appareils disposés en relais.

FIGURE 68.



La fig. 68 représente une application de ce système à un appareil récepteur dont l'électro-aimant seul est ici représenté. Il est recouvert de deux fils distincts : le premier par lequel

Janvier 1860.

44

arrive le courant de la ligne pour aller ensuite au sol, et par dessus ce premier fil, un deuxième, enroulé en sens inverse, communiquant d'un côté au pôle cuivre d'une pile locale (qui doit se composer d'un ou plusieurs couples de la pile de ligne, et de l'autre au contact B).

Aussitôt que le courant de la ligne parcourra le premier fil, l'armature L sera attirée, et dès qu'elle sera arrivée à la limite de sa course, elle fermera, par l'intermédiaire de l'articulation O, le circuit de la pile locale, dont le courant, parcourant le deuxième fil, agira en sens inverse du premier sur le fer de l'électro-aimant. Ce nouveau courant ne neutralisera pas le magnétisme développé par le courant de la ligne, mais en diminuera seulement la force. Cependant comme l'armature se trouvera tout à fait rapprochée de l'électro-aimant, l'attraction que celui-ci exercera suffira pour la maintenir assez fortement, s'il en est besoin.

Aussitôt que le courant de la ligne cessera, le courant local, subsistant encore, remplacera aussitôt l'aimantation primitive par une aimantation en sens contraire, qui, se trouvant de même sens que celle développée par influence dans l'armature, agira sur celle-ci par répulsion. Cette répulsion, si faible qu'elle soit, ayant pour effet immédiat de faire cesser le contact et de rompre le circuit local, le plus faible ressort suffira pour ramener l'armature à sa position initiale.

Il est facile de voir que le contact de l'armature contre l'électro-aimant peut avoir lieu sans adhérence nuisible, puisque non-seulement il n'existe plus de magnétisme rémanent qui puisse le retenir, mais encore son rappel sera aidé par l'action répulsive du magnétisme développé par le courant local.

L'armature se trouvant ainsi, à l'état de repos, plus rapprochée de l'électro-aimant, l'attraction sera plus énergique et plus prompte, et l'on pourra opérer avec des courants moins intenses et donner au ressort une tension très faible, ou, en opérant dans les conditions ordinaires, augmenter la tension du ressort et rendre les transmissions beaucoup plus rapides et plus sûres.

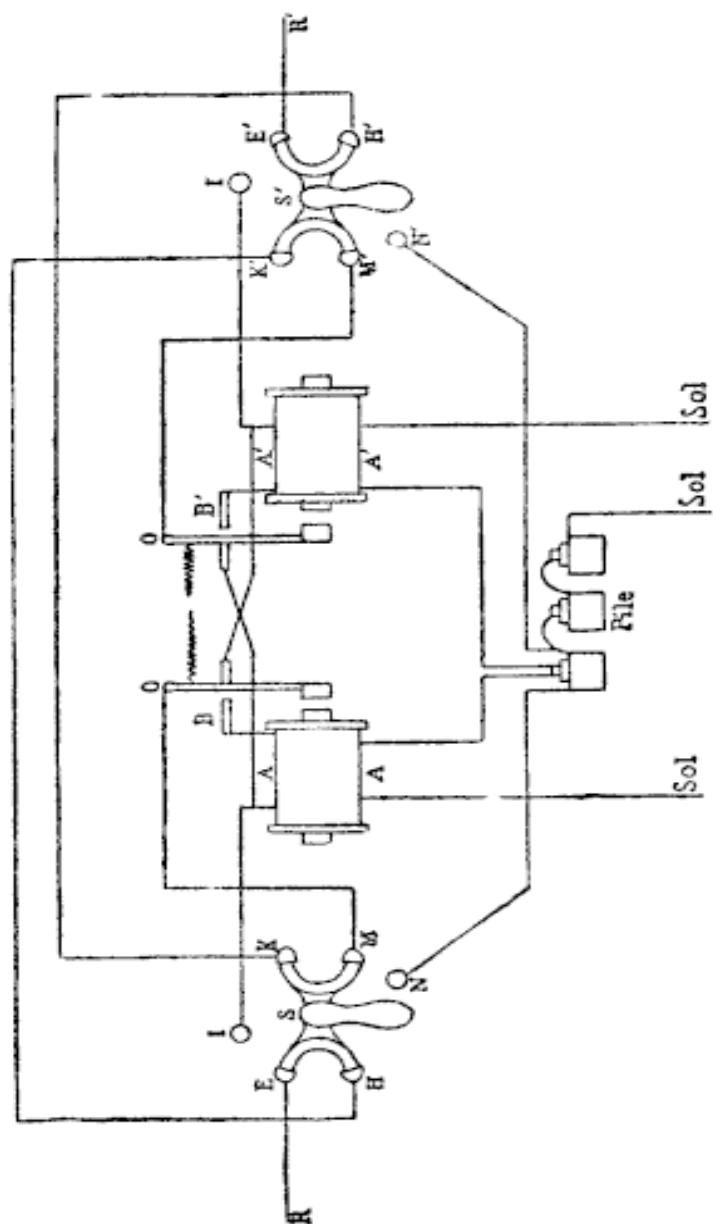
Cette tension devra toujours opposer une résistance inférieure au minimum de force dont l'électro-aimant est susceptible ; mais elle pourra être réglée une fois pour toutes, puisqu'elle n'aura plus à vaincre l'action toujours variable du magnétisme remanent.

La longueur du deuxième fil, ainsi que la puissance de la pile locale, doivent être calculées de manière à produire un effet au moins égal au maximum du magnétisme remanent qui peut provenir du courant de ligne, mais toujours inférieur au minimum de magnétisme produit directement par ce même courant. Cette grande latitude permet donc d'adopter pour chaque genre d'appareils une longueur moyenne de fil et par conséquent une intensité moyenne de courant local pouvant toujours produire un effet utile malgré toutes les variations du courant de la ligne. Le contact de l'armature de l'électro-aimant pourra servir lui-même à fermer le circuit de la pile locale.

La figure 69 représente deux appareils disposés pour la translation, et pouvant servir tantôt de translateurs, tantôt de récepteurs, au moyen de deux commutateurs S et S'.

Quand ces deux appareils agissent comme translateurs, ce n'est plus un courant local qui parcourt le deuxième fil mais le

FIGURE 69.



courant de la pile de la ligne que chacun d'eux envoie à la station suivante. Ainsi, quand le courant venant de R, par exemple, arrive par E H K' M' O' C' dans l'électro-aimant A, l'armature L est attirée et ferme le circuit de la pile de ligne dont le

courant traverse d'abord le second fil de l'électro-aimant A, et va ensuite, par B O M K H' E', à la station R'. Ce courant, tout en allant produire son effet à la station suivante, sert donc en même temps à détruire le magnétisme remanent de l'électro-aimant A, de la même manière que le courant local dans l'appareil récepteur précédent, et évite ainsi l'emploi d'un relai spécial et d'une pile locale.

Si, au contraire, on veut employer l'appareil A comme récepteur, il faudra tourner à gauche la mamette du commutateur S, et alors le courant venant de R arrivera directement dans le premier fil de l'électro-aimant A, par les contacts E I, et le courant partant du pôle cuivre de la pile au lieu d'aller au Poste R', traversera seulement le second fil, de manière à produire un courant inverse du courant de ligne, et ira ensuite par R O M N au pôle zinc. Mais comme, dans ce cas, l'intensité du courant que traverse ce second fil serait trop grande, s'il était fourni par la pile entière, le conducteur partant du contact N pour aller au pôle zinc de la pile, ne comprendra qu'un nombre restreint de couples destinés à fournir une intensité de courant à peu près équivalente à celle que produisait la pile entière agissant sur toute la ligne.

L'introduction du second fil de l'électro-aimant A dans le circuit aura pour effet une certaine augmentation de résistance, mais qui sera largement compensée par l'avantage d'agir sur une armature plus rapprochée et retenue au besoin par un ressort moins tendu.

Cette combinaison ne nécessite aucun changement dans les manipulateurs ni dans la manière de transmettre ; elle peut, comme on voit, s'adapter facilement, non seulement aux appa-

reils ci-dessus décrits, mais à toutes les dispositions d'appareils en usage dans la télégraphie, et cela au moyen d'une légère addition qui n'en change pas la forme. Le principe de cette disposition est excellent, il faut toutefois attendre que la pratique ait fait connaître si quelque cause accidentelle ne détruirait pas l'effet que l'on se propose d'obtenir.

§ IV.

DES PERTURBATEURS DANS LES TRANSMISSIONS TÉLÉGRAPHIQUES.

Les perturbations accidentelles que présentent les transmissions télégraphiques sont de deux espèces : celles provenant de circonstances météorologiques et celles provenant de dérangements, soit sur les lignes, soit dans les postes.

Trois espèces de phénomènes météorologiques peuvent causer ces perturbations, ce sont : les orages, les aurores boréales et certains phénomènes peu connus qui engendrent des courants continus, souvent pendant plusieurs heures, soit dans les lignes sous-marines pendant les ouragans, soit sur les lignes aériennes qui passent sur des points d'une grande altitude comme cela se présente sur quelques lignes de l'Algérie. On ne connaît aucun moyen d'éviter ces obstacles; heureusement que ce sont des accidents rares.

On ne connaît également aucun moyen de se préserver des courants qui ont pour origine les aurores polaires. Ces courants diffèrent des précédents en ce qu'ils passent alternativement

d'un sens à l'autre, qu'ils ont moins de durée que les précédents, mais que le phénomène se répète par intervalles rapprochés pendant toute la durée de l'aurore. Quant aux orages, ils déterminent dans le fil des courants de grande intensité mais presque instantanés, qui se répètent fréquemment pendant toute la durée de l'orage. L'intensité est souvent assez grande pour produire des étincelles par décharge du conducteur sur les corps voisins, et même pour briser les poteaux. Quand leur intensité est moyenne, ils fondent les fils fins des appareils qu'ils traversent.

Pour le cas des décharges par étincelles, nous ne nous occuperons que des appareils placés dans les stations. Ces appareils se composent de deux séries de pointes en regard l'une de l'autre, ou d'une seule série en regard d'une plaque métallique. L'une des séries ou la série unique est en communication avec le fil de ligne, l'autre série ou la plaque est en communication avec la terre.

Voici comment on explique l'effet préservatif de cet appareil. On sait que lorsqu'un nuage est chargé d'électricité d'une certaine nature, il détermine dans tous les corps placés au-dessous de lui une tension d'électricité contraire dont l'intensité dépend de la sienne. Si ce nuage vient à se décharger ou seulement à perdre une partie de la tension électrique qu'il possède, son influence s'amoindrit et la charge électrique des corps ambients doit diminuer, et pour cela il faut que leur électricité se perde en partie dans le sol. Nos fils télégraphiques se chargent comme les autres corps et se déchargent de même, mais pour cela ils empruntent à la terre ou lui restituent l'électricité nécessaire dans les points où ils sont en communication avec le sol, c'est-à-dire dans les stations. Cette communication avec le sol se

faisant au moyen des fils des récepteurs qui offrent une grande résistance, il y a pendant la durée de la décharge une grande tension en avant de ces fils qui sont très fins. On connaît la propriété des pointes de ne pouvoir permettre à l'électricité de de s'accumuler et de lui donner un passage facile ; la tension en avant du fil fin ne peut donc se maintenir et il y a décharge par les pointes.

Pour que cet effet se produise, il faut que la résistance que l'air oppose toujours, même à l'électricité, s'écoulant par des pointes, puisse être vaincue, et pour cela il faut que la tension ait une certaine valeur.

Du reste, qu'il y ait étincelle ou qu'il n'y en ait pas, le fil de la bobine se trouve traversé par un courant d'une singulière énergie qui peut être suffisant pour échauffer ou même fondre le fil des bobines. On a remarqué que lorsqu'un courant suffisant traversait un circuit composé de fils de diverses grosseurs et de diverses natures, ceux qui offraient le plus de résistance sur l'unité de longueur s'échauffaient les premiers. Il a suffi alors de faire précéder le fil des bobines d'un fil plus fin en métal plus résistant que le fer, de l'envelopper de soie et de l'enrouler autour d'un cylindre en métal communiquant avec le sol pour voir ce fil additionnel ou fondre et interrompre la communication du récepteur avec la ligne, ou simplement s'échauffer, brûler son enveloppe de soie, se mettre en communication avec le sol et préserver ainsi les fils des récepteurs.

Les autres perturbations peuvent avoir trois causes : ou des ruptures de conducteur, ou leur mélange fortuit, ou des communications accidentnelles avec le sol. Nous allons indiquer le moyen de procéder à la recherche de ces divers dérangements.

La rupture d'un fil, sans communication avec la terre, détermine l'interruption du courant dans le circuit dont il fait partie. Si donc on ne reçoit rien et on ne transmet rien, il y a lieu de croire que le circuit est rompu. On s'assure d'abord que la rupture est dans la station ou en dehors, en attachant un fil à la terre par une de ses extrémités et par l'autre au fil qui ne fonctionne pas, au point où il entre dans la station. Si, en se mettant sur contact, le galvanomètre cause un fort courant, on peut être sûr que la rupture est en dehors du poste. On peut encore détacher le fil du bouton d'entrée du récepteur et y attacher le bout du fil d'essai que nous avions mis à la terre. Il faut dans ce cas n'opérer qu'avec un très-petit nombre d'éléments, douze au plus. Si par ce procédé on n'aperçoit pas le passage d'un courant, il faut en conclure que la rupture existe dans la station. On s'assure du point exact où elle a lieu, en détachant le fil d'essai de l'entrée du bureau et en l'attachant successivement avant et après le paratonnerre : c'est le plus souvent là que fil est rompu. Si, après avoir attaché le fil après le paratonnerre, on n'a pas de courant, il faut, afin d'avoir toujours la boussole dans le circuit, laisser le fil d'essai attaché comme il vient d'être dit, et prendre un second fil que l'on attache à la boussole, du côté opposé au paratonnerre, après avoir détaché le fil qui y était fixé. Le bout libre de ce second fil d'essai est ensuite attaché successivement avant et après le manipulateur, pour s'assurer que ce n'est pas là qu'a lieu l'interruption du circuit. Si on n'avait pas encore de courant après avoir remis ce bout du fil au pôle de la pile, c'est que la pile ne fonctionnerait pas, à moins que ce ne soit la boussole ; on peut ou changer cette dernière ou prendre les deux pôles de la pile pour mettre l'un au-dessus de la langue, l'autre au-dessous : la sensation indique si un courant a lieu et par conséquent si la pile est bonne.

Quand on a reconnu que la pile est en bon état, ou si, après l'avoir réparée, on ne transmettait rien, c'est que le fil de ligne serait rompu, sans communication avec la terre ; si, au contraire, on envoyait un courant, c'est qu'en même temps que la pile était en mauvais état, le fil du récepteur était rompu ; ce dont on s'assure en mettant, comme nous l'avons déjà dit, un fil de communication entre le bouton d'entrée du récepteur et le bouton de ligne du manipulateur.

Quand on transmet un courant sur la ligne et qu'on ne reçoit pas, ou le récepteur est en mauvais état, ce dont on s'assure, comme nous venons de le dire, ou il y a une communication avec la terre. On s'assure du point où se trouve ce contact, en rompant le circuit après l'entrée du fil dans la station, avant et après le paratonnerre : le point après lequel le courant cesse de passer est celui qui est défectueux ; c'est encore souvent le paratonnerre.

S'il y a mélange de fils, on reconnaît tout de suite si le mélange existe avec un fil de la compagnie de chemin de fer, par la nature des réceptions que ce mélange produit ; si c'est un fil qui, appartenant à l'État, produit le mélange, il n'y a plus qu'à s'assurer que le point défectueux n'est pas de la poste. On en est certain si, après avoir détaché les fils à l'entrée de la station, on cesse de recevoir dans son appareil récepteur le courant que l'on envoie par l'autre manipulateur. Si ce phénomène ne cesse pas d'avoir lieu, on se met sur contact et l'on détache successivement les diverses parties du fil, jusqu'à ce que le courant cesse ; le point où cette cessation a lieu est celui où s'est produit le mélange.

Il y a un cas où tous les phénomènes du mélange des fils se produisent, mais qui a pour cause ou la rupture ou la résistance

insolite du fil de terre; alors, quand on transmet par un fil les autres récepteurs reçoivent, et quand on reçoit tous reçoivent les mêmes signaux. Dans le premier cas, le fluide négatif de la pile ne trouvant pas d'issue ou une issue suffisante par la terre de la station, remonte en tout ou en partie par les fils de terre des autres récepteurs, traverse leurs bobines, les fils de ligne et s'écoule dans le sol aux stations correspondantes, après les avoir fait fonctionner. Les récepteurs de la station où le fil est rompu sont donc traversés par un courant d'électricité négative, allant du bouton de terre au bouton de ligne; ce courant est de même sens que le courant d'électricité positive, reçu des correspondants, qui lui, au contraire, va du bouton de ligne au bouton de terre. Les récepteurs des correspondants qui reçoivent sans que le courant leur soit envoyé avec intention, reçoivent de l'électricité négative dans le sens du bouton de ligne au bouton de terre, ce qui donne un courant de sens contraire à celui qu'ils reçoivent habituellement.

Quand un poste éprouve ce dérangement et qu'il reçoit, tous les récepteurs fonctionnent; mais alors les récepteurs qui reçoivent quand cela ne devrait pas être sont traversés par des courants de sens contraire à ceux qu'ils reçoivent habituellement, car l'électricité positive envoyée par une des lignes, après avoir traversé le récepteur correspondant, ne trouvant pas d'issue dans le sol ou n'en trouvant pas une suffisante, remonte par les fils de terre des autres récepteurs, les traverse pour se perdre chez les correspondants qui ne transmettent pas. Les récepteurs sont traversés par de l'électricité positive qui, dans le poste en dérangement va du bouton de terre au bouton de ligne, contrairement au sens ordinaire, et dans les correspondants va comme d'habitude du bouton de ligne au bouton de terre.

Le sens des courants qui simulent le mélange suffit donc pour faire facilement distinguer ce cas. Il est bien entendu qu'il faut pour cela que la station ait plusieurs récepteurs, sans quoi les choses se passent comme pour un fil simplement rompu. Aussi, est-il bon d'avoir, pour ces cas spéciaux, deux communications avec la terre, dont l'une peut ne servir que pour envoyer si, lorsqu'il semble que le fil est rompu sur la ligne, ce n'est pas en réalité le fil de terre qui a éprouvé cet accident. Pour faire l'essai, on réunit le fil à l'entrée de la station avec la deuxième communication avec la terre, et le courant doit faire voir son passage dans la boussole quand on se met sur contact.

Nous aurions eu à parler maintenant de la construction des lignes; mais ce cours n'étant pas destiné aux fonctionnaires chargés de ces travaux, nous n'entreprendrons pas cette étude.

FIN.

ERRATUM. — A la page 173, nous avons attribué à M. John l'invention du tire-ligne pour tracer avec de l'encre les signaux Morse, c'est M. Cacheleux, stationnaire de l'administration télégraphique de France, qui en est l'inventeur, M. John a substitué une molette au tire-ligne.

RÉSUMÉ DES COURS
DE
TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE
FAITS AU MINISTÈRE DE L'INTÉRIEUR
POUR L'INSTRUCTION DES AGENTS DE L'ADMINISTRATION
DES LIGNES TÉLÉGRAPHIQUES.

(Annexe au *Moniteur Télégraphique*.)

COURS THÉORIQUE.

ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME

INTRODUCTION.

Les premières découvertes en électricité remontent à 600 ans avant l'ère chrétienne.

Thalès de Milo, philosophe grec, observa que l'ambre (en grec *λάσπες*,) acquiert par le frottement la propriété d'attirer les corps légers. On reconnut plus tard qu'un certain nombre de corps peuvent donner lieu au même phénomène.

Jusqu'au dix-huitième siècle, cette partie de la physique ^{fit} peu de progrès.

Vers 1729, l'Anglais Stephen Gray parvint à électriser les métaux par leur contact avec une substance préalablement électrisée, et classa les corps en deux catégories distinctes, les corps conducteurs et les corps isolants.

La machine électrique était une conséquence naturelle des travaux de Stephen Gray; elle fournit aux savants un instrument précieux et leur permit d'étudier plus complètement l'agent qui, plus tard, devait fournir des applications si merveilleuses.

En 1733, un Français nommé Dufay, reconnut l'existence de deux forces électriques opposées et fut conduit à admettre deux fluides différents.

La bouteille de Leyde fut découverte peu de temps après (vers 1746), par Muschenbroeck; toutefois l'explication de cet appareil ne fut donnée que plus tard.

Enfin, la théorie de l'électricité statique fut complétée par les travaux si connus de Franklin, sur l'identité des phénomènes électriques et des phénomènes atmosphériques.

Une nouvelle ère s'ouvrit pour l'électricité, en 1790, lorsque Volta présenta la pile à la suite des expériences curieuses de Galvani.

A partir de cette époque, les travaux et les découvertes se succéderent rapidement; les lois et les propriétés de l'électricité, étudiées par l'expérience et l'analyse, furent complètement fixées, et cette branche si importante de la physique qui jusqu'alors était restée en retard dépassa presque toutes les autres, par l'étendue et la diversité de ses applications.

HYPOTHÈSE DES FLUIDES ÉLECTRIQUES.

L'étude de la physique serait à peu près impossible, si l'on se bornait à la simple énonciation des faits et des lois qu'on découverte chaque jour sans chercher à les relier par des théories.

Comme la cause première des phénomènes est ordinairement inconnue, on est obligé d'établir un point de départ et de formuler des hypothèses. Il peut arriver que des découvertes nouvelles viennent démontrer l'insuffisance ou l'inexactitude de ces hypothèses ; on est alors obligé de les modifier ou d'en établir de nouvelles. Aussi doit-on les considérer, surtout au début, beaucoup plus comme un moyen de classer les faits et de les énoncer simplement, que comme l'expression exacte de ce qui existe.

C'est ainsi que pour l'explication des phénomènes d'optique, Newton fut conduit à admettre que les corps lumineux émettent des particules infiniment ténues, qui, traversant l'espace, viennent frapper l'organe de la vue et produisent la sensation lumineuse. À l'époque où cette hypothèse fut présentée, elle permettait d'expliquer tous les phénomènes connus ; mais des travaux plus récents conduisirent à la découverte de faits nouveaux qui ne pouvaient s'accorder avec l'hypothèse de Newton, et les physiciens l'abandonnant complètement, regardèrent la lumière comme le résultat des vibrations d'un fluide auquel ils donnèrent le nom d'éther. Ce fluide qui échappe à nos sens, remplit tout l'espace ; il existe même dans les corps sous différents états.

Lorsque ce fluide est mis en mouvement par un corps lumineux, les vibrations se transmettent à la manière des ondes sonores et produisent sur l'œil une sensation analogue à celle du son sur l'organe de l'ouïe.

Il en a été de même pour l'électricité : à la suite des premières découvertes, on admit l'existence d'un fluide unique se développant par le frottement sur certains corps et agissant par attraction sur la matière ; plus tard, on renonça à l'idée d'un seul fluide pour en admettre deux distincts, jouissant de propriétés complètement opposées et s'annulant mutuellement.

Cette dernière hypothèse elle-même est actuellement fort contestée ; il existe, en effet, certains cas qu'elle ne permet pas d'expliquer simplement. On revient peu à peu à la supposition d'un seul fluide. Quelques savants, repoussant même toute idée de fluide nouveau, ne voient dans l'électricité qu'une manifestation sous un aspect différent de l'éther, qui est déjà considéré comme la cause première de la lumière et de la chaleur.

Nous n'entreprendrons pas ici une discussion sur ce sujet si délicat, qui ne peut d'ailleurs être traité qu'après une étude complète et approfondie de tous les faits qui se rattachent à l'électricité.

L'hypothèse des deux fluides est, sans contredit, celle qui permet d'énoncer le plus simplement les faits, aussi la conserve-t-on, en général, dans les traités élémentaires, et il est probable qu'elle pourra toujours subsister au moins comme moyen de faciliter l'élocution, si l'on convient de ne donner aux mots fluides qu'une acception vague représentant deux états différents et opposés, quelle qu'en soit du reste la cause première.

PRINCIPES ÉLÉMENTAIRES.

Voici les principes élémentaires sur lesquels repose toute la théorie de l'électricité.

Il existe dans la nature deux fluides distincts, impondérables

et invisibles, nommés électriques, qui sont répandus sur tous les corps, en quantités égales à l'état ordinaire.

Les molécules d'un même fluide se repoussent et attirent celles de l'autre fluide.

La réunion de deux masses égales des deux fluides électriques, produit une combinaison qu'on nomme fluide neutre, qui est sans aucune action ; ainsi les corps de la nature, bien que contenant toujours une quantité indéfinie d'électricité, ne donnent lieu à aucune manifestation électrique.

Cette neutralisation de l'un des fluides par l'autre, leur a fait donner les noms de fluide positif et de fluide négatif, ou d'électricité positive et négative.

La séparation des deux fluides, ou, en d'autres termes, la décomposition du fluide neutre, peut s'opérer de diverses manières. La plus simple consiste à frotter deux corps l'un contre l'autre : un des corps se charge d'électricité positive et l'autre d'électricité négative, et les quantités des deux fluides ainsi développées sont évidemment égales.

Les fluides électriques se propagent facilement sur certains corps qu'on nomme conducteurs, tandis que sur d'autres, qu'on désigne sous le nom de corps isolants, aucune transmission de l'électricité ne peut avoir lieu. Cette propagation de l'électricité tient à la répulsion qu'exercent les molécules d'un même fluide les unes sur les autres. Les corps opposent une résistance plus ou moins grande à l'écartement des molécules, ce qui produit la différence dans leurs propriétés conductrices.

La terre peut être considérée comme une immense sphère conductrice ; de sorte que, si une substance contenant de l'électricité est mise en communication avec le sol, le fluide qu'elle contient se répand dans la terre, et à cause de sa grande dimension, semble entièrement disparaître.

Deux masses d'électricité s'attirent proportionnellement au produit des quantités d'électricité qu'elles contiennent et en raison inverse du carré de la distance qui les sépare. Ainsi, m et m' étant les quantités d'électricité répandues sur deux corps, et d la distance qui les sépare, la force d'attraction de ces deux corps, s'ils sont chargés d'électricités contraires et de répulsion, s'ils sont chargés du même fluide, est :

$$\frac{m m'}{d^2}.$$

Lorsque deux masses d'électricités contraires sont en présence, si aucune distance ne les sépare, elles s'attirent, et une quantité quelconque de l'un des fluides annule ou neutralise une quantité égale du fluide contraire.

Si, au contraire, les deux fluides sont séparés par un corps isolant, la neutralisation n'a plus lieu pour des quantités égales : une masse A d'électricité ne peut neutraliser qu'une quantité moindre de l'autre fluide qu'on peut représenter par mA , m étant une fraction qui dépend de la distance des deux masses électriques et même de la nature du corps qui les sépare.

DÉMONSTRATIONS EXPÉRIMENTALES.

Les principes qui précèdent, une fois l'hypothèse des deux fluides admise, se démontrent facilement par l'expérience.

En premier lieu, on reconnaît l'existence de l'électricité sur un corps par l'attraction qu'il exerce sur les corps légers environnents. Si donc on suspend à un fil une petite balle de sureau, un corps sera électrisé s'il l'attire. Cet appareil se nomme pendule électrique.

Cela posé, on trouve aisément qu'en frottant un bâton de verre avec du drap, il attire la balle de sureau, et qu'il la repousse dès qu'il l'a touchée. Un bâton de résine frotté de la même manière produit le même effet, mais il attire la balle lorsqu'elle a été

électrisée par son contact avec le verre. De là résulte naturellement la différence des deux fluides.

Afin de les distinguer, on convient de nommer fluide positif celui qui se développe sur le verre par son frottement avec un morceau de drap, et fluide négatif, celui qui se développe sur la résine frottée de la même manière. On leur donne souvent aussi les noms de fluide vitré et de fluide résineux.

Lorsqu'un corps métallique a été touché à l'aide d'un corps préalablement chargé d'électricité, il s'électrise dans toutes ses parties, tandis que d'autres, comme le verre, les corps résineux, etc., ne s'électrisent qu'au point de contact. Il y a donc deux catégories distinctes de corps : les corps conducteurs sur lesquels se propagent les fluides électriques et les corps non conducteurs ou isolants ; mais comme dans la nature il n'existe jamais de séparation absolue, il existe des corps qui sont médiocrement conducteurs, et d'autres qui sont plus ou moins isolants.

Voici comment les corps peuvent être rangés dans l'ordre de leur conductibilité :

Tous les métaux,	}	conducteurs.
Le charbon bien brûlé,		
Les acides,		
L'eau,		
La vapeur d'eau.		
Les oxydes métalliques,		
La glace,		
Le caoutchouc,		
Le verre,		
La cire,		
Le soufre,	}	isolants.
Les résines,		
La gomme laque,		
La gutta-percha,		

La propagation de l'électricité tient, comme nous l'avons dit, à la répulsion qu'exercent les molécules d'un même fluide les unes sur les autres; plus le rapprochement de ces molécules, ou, en d'autres termes, plus la quantité d'électricité répandue ~~sous~~ un même volume est considérable, et plus la tendance à la dispersion est grande.

Ainsi certaines substances qui peuvent isoler quand un ~~corp~~^s contient peu d'électricité, deviennent conductrices si la quantité d'électricité augmente dans certaines proportions.

Lorsqu'un corps électrisé est mis en communication avec le sol par l'intermédiaire d'un conducteur, on remarque, à l'aide du pendule électrique, qu'il perd instantanément toute son électricité, ce qui prouve l'un des principes que nous avons énoncé plus haut. On nomme souvent pour cette raison, la terre, le ~~r~~^e servoir commun.

Il faut donc, pour qu'un corps conducteur puisse être électrisé, qu'il n'ait avec le sol de contact que par l'intermédiaire de ~~corp~~^s qui ne puissent conduire l'électricité, ou, autrement dit, qu'il soit isolé.

Pour étudier les lois de l'attraction et de la répulsion des fluides électriques, le moyen qui se présente le plus naturellement à l'esprit consiste à employer une balance ordinaire.

Au-dessous de l'un des plateaux, on suspend une petite sphère en métal à l'aide d'un corps isolant, et dans l'autre plateau, on met des poids de façon à rétablir l'équilibre. On reconnaît d'abord que, si l'on électrise la boule, l'équilibre de la balance n'est pas troublé. Ce qui démontre que les fluides électriques sont impénétrables.

Si maintenant on place au-dessous de la sphère électrisée ~~un~~ corps chargé d'électricité contraire, il y a attraction et le plateau

teau s'incline. Pour rétablir l'équilibre, il faut ajouter dans l'autre des poids dont le nombre représente évidemment la force d'attraction.

Supposons que la sphère et le corps soient placés à 1 décimètre de distance et que le poids qui mesure l'attraction soit de 3 décigrammes ; on fait une seconde expérience en rapprochant le corps électrisé, l'attraction augmente et, pour conserver l'équilibre, on doit ajouter de nouveaux poids.

On trouve ainsi que si la distance, au lieu d'être de 1 décimètre, est seulement de $1/2$ décimètre, la force d'attraction est de 12 décigrammes, c'est-à-dire quatre fois plus considérable.

Si la distance est réduite au tiers, l'attraction est neuf fois plus grande et ainsi de suite.

On peut donc dire que la force d'attraction est en raison inverse du carré de la distance.

Pour étudier la répulsion, on peut opérer de même ; seulement il faut ajouter les poids dans le plateau qui supporte la sphère électrisée.

Pour apprécier l'influence de la quantité d'électricité, on suit une marche analogue ; on présente au-dessous de la sphère suspendue au plateau de la balance une boule en métal, chargée préalablement d'électricité, et on détermine la force d'attraction. On touche ensuite cette boule avec une autre exactement pareille et on les présente successivement à l'appareil. On trouve ainsi que, pour chacune d'elles, l'attraction est précisément la moitié de ce qu'elle était dans le premier cas, ce qui prouve en premier lieu que la charge électrique s'est également répartie sur les deux boules et, en outre, que l'attraction, pour une quantité moitié moindre, est réduite de moitié. On peut donc dire que l'attraction qu'un corps électrisé exerce sur un autre, est proportionnelle à la quantité d'électricité qu'il contient.

Ainsi, en désignant par m la masse d'électricité que contient un corps, par d la distance qui le sépare d'un autre corps électrisé, la force d'attraction ou de répulsion est représentée par la formule $\frac{m}{d^2}$. Si la charge électrique du second corps varie, la force varie naturellement et également dans le rapport de la quantité d'électricité qu'il contient; en désignant par m' cette masse, l'action des deux corps, l'un sur l'autre, est donc $\frac{m m'}{d^2}$. Elle est répulsive si les deux corps sont chargés de la même électricité, et attractive dans le cas contraire.

Au lieu d'employer une balance ordinaire pour déterminer ces lois, on se sert d'un instrument nommé balance de Coulomb, du nom de son inventeur, qui est beaucoup plus sensible et permet d'obtenir une grande exactitude.

Cet appareil comprend une aiguille horizontale en gomme laque suspendue à l'extrémité d'un fil d'argent. Cette aiguille est terminée par un petit disque en clinquant qu'on peut électriser. Le fil est fixé à l'extrémité d'un long tube vertical, au centre d'un disque de cuivre portant des divisions, et que l'on peut tourner à la main. Une cage en verre entoure l'aiguille et porte également des divisions.

A l'état de repos, l'aiguille se place dans une position telle que le fil n'ait aucune torsion. Si l'on électrise le disque de clinquant et qu'on lui présente un corps chargé de la même électricité, il y a répulsion et l'aiguille en gomme laque tourne en tordant le fil d'argent. On a facilement l'angle de torsion, qui est celui que fait l'aiguille avec sa position primitive, et qu'on trouve au moyen des divisions marquées sur la cage de verre.

Or des expériences nombreuses faites préalablement par Coulomb l'ont conduit à ce résultat, que lorsqu'un fil d'argent est

tordu, la force avec laquelle il tend à revenir à l'état normal est proportionnelle à l'angle de torsion.

On peut donc dire que l'angle dont tourne l'aiguille dans la balance, est exactement proportionnel à la force de répulsion développée par l'électricité.

Si maintenant on fait varier successivement la charge électrique et la distance de la boule au disque de clinquant électrisé, on arrive aux lois que nous avons énoncées plus haut.

Cet appareil peut aussi servir à comparer les quantités d'électricité que contiennent divers corps, puisque ces quantités sont proportionnelles à la répulsion ou à l'attraction qu'ils exercent sur le disque de clinquant électrisé d'une manière constante.

On peut ainsi reconnaître que si deux corps sont chargés de fluides contraires, mais en quantités égales, et si on les met en contact, toute trace disparaît. Si l'un contient une quantité *A* de l'un des fluides, et l'autre une quantité *B* de l'autre, il reste sur les deux corps, après le contact, une quantité *A-B* d'électricité de même nature que celle qui était sur le premier corps, si *A* est plus grand que *B*.

Quant au développement de l'électricité, on reconnaît facilement qu'en frottant un bâton de verre avec un morceau de drap qu'on a soin d'isoler, le premier se charge d'électricité positive, tandis que le second s'électrise négativement quand le morceau de drap n'est pas isolé, ce qui a lieu ordinairement ; le fluide négatif se développe également, mais il se perd sous le sol à mesure qu'il se produit.

Les corps possèdent à divers degrés la propriété électrique, c'est-à-dire qu'ils peuvent s'électriser plus ou moins facilement par le frottement et prendre l'un ou l'autre des fluides électriques.

L'état de la surface influe beaucoup sur l'état électrique des corps ; ainsi le verre poli s'électrise positivement, tandis que le verre dépoli s'électrise négativement lorsqu'il est frotté avec de la laine.

La plupart des corps se chargent d'électricité positive quand on les frotte avec certaines matières, et au contraire se chargent d'électricité négative quand on les frotte avec d'autres. On peut même ranger toutes les substances dans un ordre tel que chacune s'électrise négativement quand on la frotte avec celles qui la précédent, et positivement avec celles qui la suivent dans la liste.

INSTRUMENTS ET CONSÉQUENCES DES PRINCIPES PRÉCÉDENTS

On nomme électroscopes les appareils qui servent à reconnaître la présence de l'électricité et à déterminer sa nature. Nous avons déjà parlé du pendule électrique composé d'une balle de sureau suspendue à l'extrémité d'un fil isolant.

L'électroscope à pailles d'or est formé de deux petites feuilles très-minces d'or, suspendues à la partie inférieure d'un plateau métallique. Quand on touche le plateau avec un corps électrisé, les deux pailles se chargent de la même électricité et s'écartent. La divergence subsiste après avoir enlevé le corps électrisé.

Si l'on veut reconnaître la nature d'électricité que possède un corps, on commence par électriser les deux pailles au moyen d'un bâton de verre préalablement frotté avec un morceau de drap ; on lui présente ensuite le corps à essayer. Si la divergence des pailles augmente, le fluide qui produit cet effet est évidemment positif ; dans le cas contraire, il est négatif.

Les électromètres sont destinés à mesurer les quantités d'électricité que contiennent les corps. Nous avons déjà décrit la balance de Coulomb, qui peut servir à cet usage. Pour comparer, par

exemple, les quantités d'électricité que contiennent deux boules, on commence par charger de fluide contraire le disque en clinquant de l'aiguille de la balance, puis on lui présente la première boule. Il y a répulsion et l'aiguille tourne ; supposons qu'elle s'arrête à 20° . On présente alors la seconde boule ; la déviation augmente si elle est plus chargée que la première, mais on tourne le disque supérieur qui supporte l'aiguille, de façon à ramener l'aiguille à la même position de 20° . Dans les deux expériences, la distance des corps électrisés est la même ; les forces qui produisent la répulsion sont donc uniquement proportionnelles aux quantités d'électricité que contiennent les deux boules. Or ces forces sont elles-mêmes proportionnelles aux angles de torsion du fil d'argent. Pour la première boule, il est 20° ; pour la seconde, il est 20° , plus l'angle dont on a dû tourner le disque supérieur pour maintenir l'aiguille dans la même direction. Si cet angle est de 15° , les masses électriques seront entre elles dans le rapport de 20 à 35.

Quand on veut simplement se rendre compte approximativement de la charge électrique d'un conducteur, on fixe au-dessus un pendule électrique muni d'un cadran. Le fil qui supporte la boule, au lieu de rester vertical, prend une certaine inclinaison qui permet d'apprécier la masse d'électricité qui produit la répulsion.

L'électricité réside à la surface des corps. Cette proposition est une conséquence du principe que nous avons posé, que deux masses électriques de même nature se repoussent en raison inverse du carré de leur distance, et proportionnellement au produit des quantités d'électricité qu'elles renferment. En effet, quand on cherche par le calcul les conditions d'équilibre d'un fluide qui jouit de telles propriétés, on trouve que dans l'intérieur il ne peut pas exister de molécules, car elles seraient repoussées inégalement dans les diverses directions.

On peut, du reste, prouver facilement ce fait par l'expérience. Si l'on électrise une sphère creuse, et qu'on touche l'intérieur avec un petit disque métallique fixé à l'extrémité d'une tige isolante, on trouve que le disque ne possède aucune trace d'électricité, tandis qu'il se charge lorsqu'on le met en contact avec l'extérieur. Quand l'on recouvre la sphère de deux hémisphères en métal, et qu'on électrise l'appareil, les deux hémisphères seuls contiennent le fluide, car si on les enlève avec deux manches isolants, la sphère se trouve à l'état neutre.

Le fluide se trouve donc maintenu à la surface des corps conducteurs par leur contact avec une substance isolante qui est ordinairement l'air atmosphérique. Il exerce en vertu de sa force expansive une pression qu'on nomme tension. Plus la quantité d'électricité qui se trouve répandue sur le corps est considérable, plus cette tension est grande.

La tension électrique est analogue à la force élastique des gaz, qui est la pression exercée par eux sur les parois des vases qui les renferment. Deux vases de dimensions différentes peuvent contenir la même quantité de gaz ; mais si l'un d'eux est plus petit que l'autre, la force élastique est plus considérable ; il en est de même pour l'électricité : deux sphères de dimensions différentes peuvent être chargées également d'électricité, mais la tension est plus grande sur la plus petite des sphères, puisque les molécules du fluide sont plus rapprochées.

On voit donc que la tension représente la quantité de fluide électrique qui se trouve en un point sur une étendue constante.

Nous avons dit que certains corps isolent lorsque la force expansive de l'électricité est faible, tandis qu'ils deviennent conducteurs quand cette force est considérable. Il en est ainsi de l'air atmosphérique lorsqu'il est chargé de vapeurs d'eau ; ainsi un corps ne peut s'électriser indéfiniment à l'air libre, il arrive

toujours un moment où la tension dépasse la limite de résistance que l'air peut lui opposer, et la charge qu'on peut obtenir est d'autant plus faible que l'air est plus humide.

Plus l'air est dense, plus il est isolant; un corps électrisé, lorsqu'il est mis dans l'air raréfié, perd promptement son électricité. On peut faire facilement l'expérience en plaçant le corps sous la cloche d'une machine pneumatique et en faisant le vide.

Lorsqu'une sphère est électrisée, la tension électrique est évidemment la même à tous les points, mais il n'en est pas de même pour un corps de forme irrégulière. On trouve par l'expérience et par le calcul que pour un ellipsoïde la tension électrique est plus grande aux extrémités du grand axe qu'aux extrémités du petit; et en général la tension est toujours la plus forte aux points où la courbure est la plus grande, et elle augmente avec cette courbure.

Pour faire l'expérience on se sert d'un petit disque de clinquant (nommé plan d'épreuve) qu'on fixe à l'extrémité d'une aiguille de gomme laque; on touche avec ce disque un point du corps à essayer, et on le présente ensuite à la balance de Coulomb pour avoir la quantité d'électricité qu'il contient, et qui représente très-approximativement la tension au point qu'on a touché.

L'extrémité d'une pointe peut être considérée comme une petite surface dont la courbure est infinie; ainsi, d'après ce que nous venons de dire, si un corps est terminé par une pointe, toute l'électricité s'y porte et la tension est infiniment grande; la résistance que l'air atmosphérique peut opposer à l'électricité ayant une certaine limite, il en résulte que le fluide accumulé à l'extrémité de la pointe s'échappe. Un corps terminé par des pointes ne peut donc s'électriser.

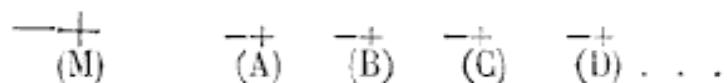
Électrisation par influence. — Imaginons un corps A chargé

d'électricité (positive par exemple) et placé auprès d'un corps conducteur B. Le fluide de A agit par influence et décompose le fluide neutre de B, attire l'électricité négative et repousse au contraire l'électricité positive. Ainsi le corps B se trouve divisé en deux parties dont une contient du fluide positif, et l'autre du fluide négatif, et si deux petits pendules électriques sont placés aux deux extrémités, on voit les fils qui supportent les balles de sureau s'élever. Si on rapproche beaucoup les deux corps, la quantité du fluide neutre décomposé augmente et par conséquent aussi la tension du fluide négatif attiré par A.

Il arrive donc un moment où cette tension est assez forte pour vaincre la résistance de l'air atmosphérique, et les deux électricités se rejoignent en produisant une étincelle; le corps B reste alors chargé uniquement d'électricité positive. C'est le même phénomène qui se produit évidemment quand on touche un corps conducteur avec un corps électrisé.

Si le corps B est terminé par une pointe placée en face de A: l'écoulement du fluide pouvant avoir lieu avec une facilité plus grande, la recomposition a lieu à une distance plus considérable. Ainsi donc un corps électrisé ne perd pas son électricité seulement quand il est terminé par une pointe, mais aussi quand on lui présente à une certaine distance un conducteur qui en est muni.

Ce que nous venons de dire montre la manière dont s'opère la transmission de l'électricité. Supposons un certain nombre de corps conducteurs, A, B, C, D, etc., situés à de très-petites distances les uns des autres,



et un corps M chargé d'électricité positive. M agit par influence sur A, décompose le fluide neutre, et attire dans le voisinage l'électricité négative en repoussant l'électricité positive. Cette dernière agit de même sur B et la décomposition du fluide neutre

se reproduit dans tous les corps. Si la tension électrique de M est assez forte pour vaincre la résistance de l'air atmosphérique, il y a réunion entre le fluide positif de M et le fluide négatif de A; la même reconstitution se produit entre A et B, B et C, et ainsi de suite.

Si les corps A, B, C sont au contact, ou si ce sont les molécules d'un corps conducteur, le phénomène doit évidemment être le même. Ainsi donc lorsqu'on touche un corps électrisé avec un conducteur, le fluide électrique ne se répand pas à la manière des gaz, mais il se produit une série de décompositions et de recompositions successives dans toutes les molécules.

Revenons maintenant au cas de deux corps, l'un A électrisé positivement, et l'autre B, conducteur et placé auprès du premier. Nous avons dit que le fluide négatif de B se porte dans le voisinage de A, et que le fluide positif est repoussé à l'autre extrémité. Si l'on touche cette extrémité avec un corps conducteur communiquant au sol, avec le doigt, par exemple, le fluide positif s'écoule, et il ne reste sur B que de l'électricité négative qui est attirée par A. Si donc on sépare les deux corps, B restera chargé uniquement d'électricité négative. On peut décharger le corps B et le présenter de nouveau à A; il se produira une nouvelle décomposition, et en touchant l'extrémité opposée de B on obtiendra une nouvelle charge électrique. Ainsi donc avec un corps électrisé on peut charger autant de fois qu'on veut un autre corps d'électricité contraire.

L'électrisation par influence permet d'expliquer tous les phénomènes d'attraction et de répulsion dont nous avons parlé plus haut.

Considérons en premier lieu un corps léger *a*, une balle de sureau par exemple, suspendue à l'extrémité d'un fil conducteur en communication avec le sol et mis en présence d'un corps électrisé positivement A. L'électricité du corps A décompose

par influence le fluide neutre de A, repousse l'électricité positive dans le sol, et la balle de sureau *a*, restant chargée d'électricité contraire, se trouve attirée.

Si la balle de sureau est suspendue à l'extrémité d'un fil isolant, et si elle se trouve à l'état neutre, il s'opère encore une décomposition; le fluide négatif est attiré par le corps électrisé A, et l'autre est repoussé à l'extrémité la plus éloignée. L'attraction exercée par A sur l'électricité contraire étant plus grande que la répulsion exercée sur l'électricité de même nom, il y a toujours attraction, et la balle de sureau est encore attirée.

Quand la balle de sureau *a*, suspendue à un fil isolant, est électrisée négativement, la présence des deux électricités contraires donne lieu à une force répulsive; mais en même temps le fluide neutre est décomposé comme dans le cas précédent, et il en résulte une force attractive. Suivant que l'une de ces deux forces est plus forte ou plus faible que l'autre, il y a répulsion ou attraction de *a*. Ainsi, si la balle de sureau se trouve placée à une assez grande distance du corps A, ou si ce corps n'est que faiblement électrisé, il se produit une répulsion, tandis que si *a* se trouve très rapproché, l'attraction qui résulte de la décomposition du fluide neutre l'emporte toujours sur la répulsion provenant des deux électricités contraires.

Imaginons enfin une balle de sureau complètement libre et placée sur une table au-dessous du corps électrisé A; elle se charge par influence d'électricité contraire et se trouve attirée. Dès qu'elle a touché A, elle prend son électricité positive, et il se produit une répulsion. La balle retombe donc sur la table; le fluide positif dont elle s'était chargée par contact, se perd dans le sol, et elle se trouve de nouveau attirée. Le même mouvement se reproduit indéfiniment et donne lieu à ce qu'on nomme la danse des balles de sureau.

Nous passons maintenant à la description des principaux appareils électriques.

APPAREILS ÉLECTRIQUES.

Électrophore. — L'électrophore se compose d'un gâteau de résine et d'un disque métallique fixé à l'extrémité d'une tige isolante. Lorsque l'on frotte le gâteau de résine avec une peau de chat, il se charge d'électricité négative. On place alors au-dessus le disque de métal, dans lequel il s'opère une décomposition du fluide neutre ; le fluide positif est attiré à la surface inférieure et le fluide négatif est repoussé à la partie supérieure. Il n'y a pas recomposition entre les électricités, négative du gâteau de résine et positive du disque, ou du moins cette recomposition est très-lente, parce que la résine ne conduit pas le fluide électrique qui se trouve répandu non-seulement à la surface extérieure, mais encore à une certaine profondeur. On touche avec le doigt la partie supérieure du disque métallique, et l'on enlève ainsi son électricité négative. Il reste donc électrisé positivement quand on le sépare du gâteau de résine. Lorsqu'on lui présente le doigt, on obtient une étincelle. On peut le placer de nouveau sur le gâteau de résine et obtenir une nouvelle charge électrique ; la même opération peut se répéter longtemps sans que le gâteau de résine cesse d'être électrisé. Cet appareil est donc une véritable machine électrique pouvant donner très-facilement des décharges électriques assez faibles.

Machine électrique. — La machine électrique se compose d'un plateau circulaire en verre qu'on peut faire tourner au moyen d'une manivelle et qui frotte contre quatre coussins fixés deux à deux en face les uns des autres aux montants qui supportent l'axe de rotation du plateau. Un conducteur en cuivre isolé par des pieds en verre embrasse, au moyen d'un arc métallique, ce plateau auquel il présente quelques pointes.

Lorsqu'on tourne le plateau de verre, son frottement contre les coussins décompose le fluide neutre et il se charge d'électricité positive. Les coussins s'électrisent négativement, mais le

fluide se perd dans le sol par les montants en bois. L'électricité négative du plateau agit par influence sur le fluide neutre du conducteur, attire l'électricité négative, qui passe par l'intermédiaire des pointes, rend au verre son état normal et laisse libre l'électricité positive, qui se répand sur toute la surface métallique.

La charge électrique du conducteur ne peut pas dépasser une certaine limite, car l'air n'est jamais complètement isolant; il arrive toujours un moment où la tension est assez forte pour vaincre sa résistance et le fluide se disperse. Lorsqu'on cesse de tourner le plateau, l'électricité se perd rapidement par les pointes qui servent à faciliter l'action du plateau sur le métal.

Il y a une autre cause qui limite la charge que peut prendre le conducteur. Le verre par son frottement se charge d'une certaine quantité d'électricité qui attire, comme nous l'avons dit, le fluide négatif du conducteur. Mais si la tension électrique développée est faible, il arrive rapidement un moment où l'électricité positive répandue sur le cylindre métallique empêche le fluide négatif d'être attiré par le verre et dès lors il ne se développe plus d'électricité; pour augmenter la charge, il faut tourner plus rapidement le plateau de verre.

Ainsi la tension électrique du conducteur dépend de la vitesse de rotation imprimée au plateau. Quant à la quantité absolue d'électricité, elle est évidemment proportionnelle à l'étendue du conducteur. Aussi dans les machines puissantes lui donne-t-on toujours de grandes dimensions.

On ajoute quelquefois à la machine des cylindres de cuivre qu'on met en communication avec le conducteur et qu'on enlève dès que la tension développée a atteint son maximum.

Pour pouvoir apprécier la charge d'une machine électrique, on se sert souvent d'un petit pendule électrique qu'on fixe à

l'extrémité du conducteur, la balle de sûreté se charge en même temps que lui et se trouve repoussée ; elle s'élève donc à mesure que la tension augmente.

Quand on présente le doigt à une petite distance du conducteur chargé de la machine électrique, il se produit une étincelle brillante et on ressent une commotion plus ou moins vive suivant la force de la charge ; le conducteur se trouve subitement déchargé. Le phénomène qui se produit ici est analogue à celui que nous avons signalé en parlant de l'électrisation par influence ; l'électricité négative est attirée à l'extrémité du doigt et s'échappe pour venir rejoindre le fluide positif qui part du conducteur.

Lorsqu'une personne se place sur un tabouret isolé du sol par des pieds de verre et touche avec la main le conducteur de la machine dont on tourne le plateau, elle se trouve électrisée et l'on peut tirer des étincelles des diverses parties de son corps ; le fluide s'échappe par les cheveux, qui se dressent spontanément, surtout quand on place au-dessus un corps communiquant avec le sol.

L'électricité, en s'écoulant par les pointes, produit en sens contraire, sur les corps dont elle s'échappe, une réaction analogue à celle que l'eau exerce contre les parois d'un vase en s'écoulant par une mince ouverture. On peut s'en assurer au moyen d'un petit instrument nommé tourniquet électrique. Il se compose de quatre rayons métalliques recourbés à angle droit dans le même sens, terminés par des pointes et fixés à une chape qu'on place sur une petite tige posée sur la machine.

Quand on tourne le plateau, le fluide électrique s'échappe par les pointes et les fait tourner dans la direction opposée à l'écoulement du fluide.

On peut obtenir avec la machine électrique les deux électricités développées simultanément sur deux conducteurs diffé-

rents ; il suffit d'isoler les coussins et de les faire communiquer avec un autre cylindre métallique séparé du premier ; il se trouve en effet chargé négativement, tandis que l'autre l'est positivement.

Le frottement de la vapeur contre des corps développe aussi de l'électricité. Cette propriété a donné l'idée à Armstrong de construire une machine hydro-électrique, qui se compose d'une chaudière portée sur des pieds en verre et au moyen de laquelle on produit de la vapeur d'eau. Cette vapeur, en s'échappant par un robinet, frotte contre les parois et vient se condenser sur des petits peignes métalliques isolés, placés à une certaine distance. La chaudière s'électrise négativement et la vapeur chargée de fluide positif l'abandonne aux petits peignes métalliques sur lesquels elle vient se condenser.

Condensateurs. — Les condensateurs sont destinés à permettre d'accumuler sous de petits volumes de grandes quantités d'électricité. Ils sont fondés sur la propriété de deux fluides de s'attirer et de se neutraliser à distance.

Imaginons deux plaques métalliques, A et B, qu'on nomme armatures, placées à une petite distance l'une de l'autre et séparées par un corps isolant. On met la première A en communication avec le conducteur d'une machine électrique chargée ; si elle existait seule, elle prendrait une quantité d'électricité assez faible, dépendant de la tension, qui serait la même que celle du conducteur de la machine, et de son étendue. Mais si le corps B se trouve en présence, son fluide neutre est décomposé ; son électricité négative est attirée à la surface voisine de A et son électricité négative repoussée dans le sol, si l'on fait communiquer B avec la terre, en le touchant avec le doigt, par exemple. Le fluide négatif de B est donc neutralisé par A, puisqu'il reste sur la surface sans s'écouler dans le sol par le corps conducteur qui établit la communication avec la terre ; cette électricité au-

rait une masse égale à l'électricité positive de A, si aucune distance ne séparait les deux corps A et B. Mais comme il ne peut en être ainsi, elle est toujours inférieure. C'est une certaine fraction de la masse électrique de A que nous représentons par $\frac{1}{n}$ et qui dépend de la distance des deux corps. Ainsi si T est la masse électrique répandue sur l'unité de surface de A, ou en d'autres termes la tension du conducteur de la machine, $\frac{T}{n}$ sera celle qui est attirée et neutralisée sur B.

Le fluide négatif de B agit à son tour sur l'électricité positive de A, et en attire une portion sur la surface voisine en la neutralisant, et comme $\frac{T}{n}$ est la masse électrique de B, $\frac{T}{n^2}$ représentera celle qui est neutralisée sur A.

Ainsi, après cette première opération, l'électricité de A se trouve décomposée en deux parties, l'une $\frac{T}{n^2}$ neutralisée par B, ou en d'autres termes à l'état latent, et l'autre $T - \frac{T}{n^2}$, qui reste à l'état libre. Sur B il existe une quantité d'électricité latente représentée par $\frac{T}{n}$.

Si l'on met le corps A de nouveau en communication avec la machine, il pourra de nouveau se charger, et la quantité d'électricité qu'il prendra sera $\frac{T}{n^2}$, pour avoir une tension T égale à celle du conducteur de la machine. Cette nouvelle charge est moindre que la première T ; elle produit sur B un effet analogue, décompose encore le fluide neutre, attire l'électricité négative contre la surface voisine, laquelle agit à son tour par influence et neutralise sur A une portion de l'électricité qu'on vient de lui ajouter.

En continuant indéfiniment l'opération, on voit que les deux plaques du conducteur se chargent indéfiniment. Au premier contact, A avait pris une masse T d'électricité; au second, une masse $\frac{T}{n^2}$, au troisième il en prendra $\frac{T}{n^4}$ et ainsi de suite, mais il arrive évidemment un moment où la quantité qu'on ajoute est infiniment faible et où l'on peut suspendre l'opération.

Quant au corps B, à la première opération il s'est chargé d'une quantité $\frac{T}{n}$ de fluide, à la seconde de $\frac{T}{n^3}$, à la troisième de $\frac{T}{n^5}$ et ainsi de suite.

Ainsi, en résumé, les deux corps A et B, au bout d'un nombre indéfini d'opérations semblables consistant à approcher et à éloigner la source électrique de A, se sont chargés de quantités d'électricité représentées par $T + \frac{T}{n^2} + \frac{T}{n^4} + \frac{T}{n^6}$, etc., pour A, et $\frac{T}{n} + \frac{T}{n^3} + \frac{T}{n^5} + \frac{T}{n^7}$, etc., pour B.

Tandis que si le disque A avait été isolé, il aurait pris seulement une masse électrique T.

On fait toujours l'opération d'un seul coup en faisant communiquer A avec le conducteur de la machine, B avec la terre et en tournant le plateau de la machine.

Ainsi, à la fin de l'opération, il se trouve sur la plaque A une quantité d'électricité libre représentée par T, puisqu'elle communique avec la machine, et sur les deux plateaux A et B une quantité dissimulée ou latente dépendant de l'éloignement des plaques l'une de l'autre.

On peut, du reste, donner une expression directe du pouvoir condensant de ces appareils. Représentons encore par T la tension

électrique du conducteur de la machine, par x la quantité d'électricité latente de A, et par y l'électricité latente de B. $T + x$ sera la masse totale d'électricité répandue sur A, et y celle qui se trouve répandue sur B. Or y étant une certaine fraction $\frac{1}{n}$ de $T + x$, on a : $y = \frac{T + x}{n}$, et puisque y agit sur x de la même manière que $T + x$ agit sur y , on a également $x = \frac{y}{n}$. De ces deux équations on tire :

$$n^2x = T + x \text{ ou } x = \frac{T}{n^2 - 1}.$$

La masse d'électricité répandue sur A est donc $T + \frac{T}{n^2 - 1}$ ou en d'autres termes $\frac{T}{n^2 - 1}$ est celle qui est due à la condensation.

Lorsqu'on réunit les deux plaques ainsi chargées d'électricité, les deux fluides se précipitent l'un vers l'autre en donnant lieu à une étincelle qui peut éclater à une distance d'autant plus grande que la charge est plus considérable.

On peut aussi opérer une décharge lente du condensateur en l'isolant. La plaque B ne contient que de l'électricité latente y ; si on la touche avec le doigt, on n'obtient donc aucune étincelle; mais si l'on touche A, toute l'électricité libre disparaît. La masse y d'électricité se trouvait neutralisée par $T + x$; quand on enlève la portion T , une partie de y devient libre, et il ne reste à l'état latent que celle qui peut être neutralisée par x .

En touchant alors B, on enlève cette électricité libre, et sur A une portion du fluide restant se trouve de nouveau libre. Ainsi donc en mettant alternativement les deux plaques en communication avec le sol, on leur enlève à chaque fois une certaine quantité d'électricité, qui va naturellement en diminuant constamment.

Telle est la théorie de la condensation, qui joue un grand rôle en télégraphie pour les lignes sous-marines ; elles sont en effet construites de manière à constituer un immense condensateur, dont le fil conducteur forme l'une des plaques ou armatures, et le fil de fer, qui sert à protéger l'enveloppe, l'autre armature, laquelle se trouve constamment en communication avec le sol. La gutta-percha est la substance isolante qui sépare les deux armatures.

L'électricité latente ne réside pas sur les armatures du conducteur, mais bien à la surface même du corps isolant qui les sépare et qui dans les cabinets de physique est ordinairement une plaque de verre. Si, en effet, on enlève les deux plaques conductrices, on peut facilement s'assurer, au moyen de l'électroscopie, qu'elles ne contiennent pas d'électricité ; si on les replace après un certain temps contre les parois du plateau de verre, le condensateur se trouve dans les conditions primitives, et on peut en opérer la décharge.

Quand on produit une étincelle en présentant un corps conducteur aux deux armatures d'un condensateur, la décharge n'est jamais complète ; ainsi, après avoir obtenu une première étincelle, on peut ordinairement en obtenir une seconde, mais moins forte, et même une troisième, ce qui tient principalement à ce que l'électricité résidant principalement sur la surface de verre et même pénétrant à une certaine profondeur, ne peut se propager aussi rapidement que sur les corps conducteurs.

Nous ajouterons encore, que des expériences récentes de M. Faraday ont prouvé que le corps isolant qui sépare les deux armatures d'un condensateur, a une grande influence sur le pouvoir condensant, de même que la distance des deux plaques ; on a été conduit, pour expliquer cette action, à une théorie un peu différente qui consiste à admettre que l'action électrique s'exerce au contact par l'intermédiaire des molécules électriques des corps.

isolants, et non à distance, comme nous l'avons admis jusqu'ici. Cette théorie est trop peu avancée pour que nous l'exposions dans ce cours.

On donne ordinairement au condensateur une forme différente de celle que nous avons prise pour type, et on le nomme bouteille de Leyde. Il est formé d'une bouteille garnie à l'intérieur et à l'extérieur de feuilles de clinquant qui forment les armatures. Une tige traverse le bouchon et est en communication avec l'armature intérieure. On évite tout contact entre les deux surfaces métalliques en garnissant le bouchon avec de la cire à cacheter ou de la gomme laque.

Pour charger une bouteille de Leyde, on tient à la main l'armature extérieure et on présente la tige au conducteur d'une machine électrique.

La quantité d'électricité développée étant proportionnelle à la surface des armatures, on obtient des charges d'autant plus considérables, que les bouteilles de Leyde sont plus grandes. Pour obtenir des effets puissants, au lieu de donner aux bouteilles de grandes dimensions, on en réunit plusieurs en faisant communiquer toutes les armatures intérieures entre elles et avec le conducteur de la machine, et toutes les armatures extérieures avec la terre. L'effet est évidemment le même que si l'on avait un seul condensateur ayant une étendue égale à celle de toutes les bouteilles. Cet appareil se nomme batterie électrique.

La charge d'une batterie électrique est assez longue, puisqu'une machine ne peut développer dans un temps donné qu'une certaine quantité d'électricité; on peut accélérer la charge en employant un moyen particulier qu'on nomme charge par cascade. Considérons trois bouteilles A, B et C, on les isole en les placant sur un plateau de résine; on fait communiquer l'armature intérieure de la première (A) avec le conducteur de la machine, et son armature extérieure avec l'armature

intérieure de B; on fait aussi communiquer l'armature extérieure de B avec l'armature intérieure de la dernière C dont l'armature extérieure est mise en communication avec le sol. Lorsqu'on tourne le plateau en verre de la machine, la première bouteille (A) se charge intérieurement d'électricité positive, qui attire l'électricité négative de l'armature extérieure; mais le fluide positif de cette armature, au lieu d'aller dans le sol comme dans le cas ordinaire, sert à charger la seconde bouteille (B); il en est de même de la troisième. Ainsi toutes les bouteilles se chargent simultanément avec la quantité d'électricité qui sert à charger la première. Il est clair, toutefois, que la seconde est moins chargée que la première et la troisième moins que la seconde; mais lorsque l'opération est finie, on enlève les communications établies provisoirement entre les bouteilles et on achève de charger les dernières par la méthode ordinaire. On les organise ensuite en batterie comme nous l'avons indiqué plus haut.

Il y aurait danger à opérer sans précaution la décharge d'une batterie électrique, et même souvent d'une bouteille de Leyde. On se sert pour cet usage d'un instrument nommé *excitateur universel*. C'est un système de deux arcs métalliques terminés par des boules de laiton et mobiles autour d'une charnière. Il est même quelquefois prudent de tenir ces deux arcs avec des manches en verre.

La théorie de la condensation a été employée par Volta, pour obtenir un électroscopie extrêmement sensible. Nous avons déjà parlé de l'électroscopie à feuilles d'or formé d'un plateau de métal au-dessous duquel sont deux petites lames d'or qui divergent quand on touche le plateau avec un corps électrisé. Si la charge électrique de ce corps est très-faible, on obtient une divergence insensible, mais on peut l'augmenter au moyen de la condensation. On recouvre le plateau d'une couche isolante très-mince de gomme laque, et l'on place au-dessus un second disque semblable fixé à l'extrémité d'un manche en verre. En touchant le premier

avec le corps dont on veut reconnaître l'électricité, on charge par influence d'électricité contraire le disque supérieur, et si l'on touche avec le doigt la partie supérieure, il se produit une accumulation semblable à celle qu'on obtient avec les condensateurs ordinaires. On enlève le doigt et l'on sépare les deux disques; l'électricité latente du plateau inférieur devient alors libre et agit sur les deux pailles, qui divergent.

PROPRIÉTÉS DE L'ÉTINCELLE ÉLECTRIQUE.

Nous avons vu que lorsque l'on approche l'un de l'autre deux corps chargés d'électricités contraires, les deux fluides se précipitent l'un vers l'autre en produisant une étincelle; les deux électricités ne se comportent pas identiquement de la même manière dans ce phénomène, ou du moins on peut le supposer, d'après la manière dont elles s'échappent des pointes. Quand l'électricité positive se disperse dans l'air à l'extrémité d'une pointe, il se produit une petite aigrette lumineuse tant que l'écoulement a lieu; tandis que l'électricité négative produit un simple point lumineux.

L'étincelle varie beaucoup d'aspect suivant la nature des corps entre lesquels elle s'opère, ce qui prouve qu'elle est toujours accompagnée d'un petit transport de molécules solides à travers l'espace; ainsi l'étincelle est verte lorsqu'elle éclate entre deux boules argentées, tandis qu'elle est jaune entre deux pointes de charbon.

Elle est d'autant plus brillante que l'air qui entoure les corps est plus comprimé; dans l'air raréfié elle perd beaucoup de son éclat, mais elle peut se produire à des distances plus considérables. Ainsi, lorsqu'on fait le vide dans un tube terminé par deux boules métalliques et que l'on présente l'une au conducteur de la machine électrique en tenant l'autre à la main, on voit, lorsque le vide est à peu près complet, une lueur accusant le

passage de l'électricité d'une boule à l'autre. On garnit ordinairement le tube de feuilles d'étain taillées en losange et disposées de manière à ne laisser entre elles que de faibles intervalles. En répétant la même expérience, même lorsque le tube est plein d'air, on voit partir entre les feuilles d'étain une série d'étincelles brillantes, ce qui a fait donner à cet appareil le nom de tube étincelant.

L'œuf électrique qu'on a proposé plusieurs fois d'employer comme paratonnerre dans les postes télégraphiques, est un globe de verre dans lequel deux tiges de laiton traversent les parois opposées et dont les extrémités sont placées à une certaine distance. Lorsqu'on fait le vide dans l'intérieur, le fluide passe de l'une des tiges à l'autre, à une distance à laquelle on ne pourrait obtenir d'étincelles dans l'air ordinaire.

L'étincelle électrique produit dans les gaz un ébranlement qui se traduit par une augmentation subite de pression. On peut le reconnaître au moyen d'un tube recourbé fermé à l'une de ses extrémités comme un manomètre et rempli d'eau à la partie inférieure. Deux tiges métalliques traversent la partie fermée du tube ; au moment où une étincelle éclate entre elles, on voit le liquide s'élever subitement dans la branche libre. C'est cet ébranlement du gaz qui met l'air en vibration et est la cause du bruit qui accompagne toujours les décharges électriques.

L'étincelle électrique est une source intense de chaleur ; on peut enflammer l'alcool, l'éther, la poudre, etc..., au moyen d'une *bouteille de Leyde*. En faisant passer la décharge d'une batterie à travers un fil métallique assez fin, le fil s'échauffe et rougit ; il peut même se fondre ou se volatiliser s'il est en platine ou en argent ; s'il est en fer, il brûle avec une vive lumière.

Lorsqu'un corps isolant très-mince se trouve sur le passage de l'étincelle électrique, il est ordinairement percé ; ainsi une carte

se trouvant placée entre deux boules communiquant avec les armatures d'une bouteille de Leyde, si ces boules sont assez rapprochées, l'étincelle éclate et la carte se trouve percée. Le trou présente une circonstance assez remarquable consistant en ce que l'on observe des deux côtés des bavures, qui indiquent que le fluide neutre de la carte a dû être décomposé pour se porter d'un côté sur la boule électrisée positivement, et de l'autre sur la boule électrisée négativement. Quand les boules ne sont pas exactement en face l'une de l'autre, le trou ne se trouve pas au milieu, il est plus rapproché de la pointe négative que de l'autre. Le verre peut également être percé, mais il doit être très-mince.

Les effets physiologiques de l'électricité ne sont pas moins remarquables. Nous avons déjà dit qu'en présentant le doigt au conducteur d'une machine électrique, on ressent une petite commotion. Quand on opère la décharge d'une bouteille de Leyde en tenant à la main une des armatures et en touchant l'autre avec le doigt, la commotion est bien plus forte; avec une petite bouteille, on la ressent jusque dans le coude; avec une de la grandeur d'un litre, on la ressent jusque dans l'épaule.

La commotion produite par une batterie électrique peut tuer des animaux même de grande dimension.

Lorsque plusieurs personnes se donnent la main en formant une chaîne, et que la première tient à la main une bouteille de Leyde, tandis que la dernière en opère la décharge en touchant l'armature intérieure, toutes les personnes ressentent la commotion au même instant. Cette expérience, faite sur une chaîne composée d'un très-grand nombre de personnes, est une des preuves les plus évidentes de la rapidité de propagation du fluide électrique. Sur les cadavres privés récemment de la vie, l'étincelle électrique produit des contractions musculaires qui simulent quelquefois un retour à l'existence.

Il nous reste à parler des effets chimiques de l'étincelle. Nous verrons plus tard qu'il y a une relation intime entre les phénomènes chimiques et l'électricité : pour le moment, nous ne citerons que quelques effets très-simples.

L'oxygène et l'hydrogène, lorsqu'ils sont renfermés dans ^{un} vase, restent à l'état de mélange gazeux ; mais si l'on fait passer une étincelle dans ce mélange, ils se combinent immédiatement, et l'on sait que le résultat de cette combinaison est de l'eau. Il se produit dans ce phénomène un dégagement de chaleur ^{considérable}, et la vapeur d'eau développée ayant une grande force élastique, il est toujours accompagné d'une détonation assez violente. D'autres gaz, au contraire, sont décomposés par l'action de l'étincelle. L'ammoniaque, par exemple, quand on le fait traverser par une série continue d'étincelles, se décompose en azote et hydrogène.

ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

C'est à Francklin que l'on doit les premières expériences qui prouvent l'identité des phénomènes électriques et des effets produits par les orages. Il lança dans l'air un cerf-volant terminé par une pointe métallique et retenu par une corde conductrice. Chaque fois que le cerf-volant passait dans les nuages, la corde donnait des traces d'électricité ; il put même obtenir de longues étincelles partant entre l'extrémité de cette corde et le sol.

L'air contient toujours de l'électricité à l'état libre. On peut s'en assurer soit au moyen d'une boule métallique qu'on lance dans l'atmosphère et que l'on trouve électrisée après sa chute, soit au moyen d'une longue pointe s'élevant dans l'air et communiquant avec un électromètre.

Lorsque l'air est sec, l'électricité qu'il contient est toujours positive ; mais quand il est humide, il est quelquefois électrisé négativement. Plus on s'élève dans l'air, plus la quantité d'électricité qu'il contient est considérable.

La charge électrique de l'air n'est pas la même aux différents moments de la journée. Il y a deux instants où elle est maximum, et à deux autres elle est minimum.

Le 1^{er} minimum a lieu 2 heures avant le lever du soleil.

Le 1^{er} maximum — 2 — après le lever du soleil.

Le 2^e minimum — 2 — avant le coucher du soleil.

Le 2^e maximum — 2 — après le coucher du soleil.

L'électricité atmosphérique provient principalement de l'évaporation de l'eau à la surface de la terre, qui produit contre les pores du sol un frottement analogue à celui de la vapeur dans la machine hydro-électrique d'Armstrongy, dont nous avons parlé.

On peut facilement expliquer les variations de la charge électrique de l'atmosphère. Pendant la nuit, la vapeur d'eau s'est précipitée sur le sol et lui a abandonné toute son électricité, on doit donc avoir un minimum avant le lever du soleil. Lorsque le jour paraît, l'évaporation de l'eau détermine l'électrisation de l'air, qui arrive promptement à un maximum. Plus tard, la vapeur d'eau s'élève par suite de l'action calorifique des rayons solaires, et l'air se trouvant à peu près sec, doit amener avant la chute du jour un minimum à une faible hauteur. Enfin, après le coucher du soleil la vapeur d'eau se précipite à la surface de la terre en entraînant son électricité, et il arrive naturellement un moment où la charge électrique est de nouveau maximum.

L'air est donc en général chargé d'électricité positive, et par conséquent les nuages sont le plus souvent aussi électrisés positivement. Ils peuvent pourtant, dans certains cas, posséder de l'électricité négative; en effet, les nuages qui, par leur contact avec l'air, sont électrisés positivement, agissent par influence sur

le sol, qui se charge d'électricité négative, et si dans ces *cir*constances il se forme des brouillards, ils emportent en s'élevant dans l'air de l'électricité négative.

En général, la tension électrique des nuages est inférieure à celle que l'on peut obtenir avec les machines électriques dans les cabinets de physique; mais à cause de leurs grandes dimensions, la quantité d'électricité mise en jeu est bien plus considérable.

Orages. — Quand deux nuages chargés d'électricité contraire sont en présence, ils agissent l'un sur l'autre comme les armatures d'une bouteille de Leyde, et la tension électrique augmentant, il arrive un moment où les deux électricités contraires se rejoignent en produisant une étincelle que l'on nomme éclair.

Cette étincelle atteint de grandes dimensions; on en a vu qui avaient plus d'une lieue d'étendue. On peut facilement l'expliquer: dans les régions supérieures l'air est moins dense qu'à la surface de la terre, de plus l'atmosphère est toujours plus ou moins chargé de vapeur d'eau qui conduit assez bien l'électricité. Les molécules de vapeur ne sont pas en contact, et le fluide passe de l'une à l'autre comme à travers les lames conductrices du tube étincelant.

L'éclair suit tantôt une ligne droite, tantôt une ligne brisée, ce qui tient à ce que le fluide, tendant toujours à suivre les couches les plus conductrices, change de direction.

La durée des éclairs est infiniment courte, on a pu s'en assurer en faisant tourner rapidement une roue dans l'obscurité; au moment de l'éclair on voit la roue dans une position unique, tandis que si l'éclair avait une certaine durée, on n'aurait qu'une perception confuse.

La décharge électrique se produit le plus souvent entre les nuages et la terre; les nuages agissent par influence sur le sol et attirent à sa surface l'électricité contraire à celle qu'ils portent en repoussant l'autre au loin.

Lorsque la tension est suffisante, l'étincelle éclate; il est clair qu'elle a lieu ordinairement entre les nuages et les points les plus élevés, les arbres, les clochers, etc.

Le bruit qui accompagne l'éclair se nomme tonnerre; il est dû, comme celui qui se reproduit quand on décharge une bouteille de Leyde, à la vibration qu'occasionne dans l'air le mouvement des deux fluides électriques, mais il est beaucoup plus intense, la masse d'électricité étant plus considérable; il se répercute contre les couches d'air de densité différente et contre les objets situés à la surface de la terre, ce qui le prolonge et produit une sorte de roulement.

La vitesse de la lumière est infiniment grande, comparée à celle du son, qui n'est que de 330 mètres par seconde; on voit donc l'éclair au moment même de la décharge, tandis que l'on entend le son seulement quelques secondes après.

En multipliant par 330 le nombre de secondes qui s'écoule entre l'éclair et le bruit du tonnerre, on obtient approximativement la distance à laquelle a eu lieu la décharge.

Dans l'été on observe souvent des éclairs qui ne sont pas accompagnés de bruit du tonnerre, et qu'on nomme éclairs de chaleur; ils sont dus à des orages trop lointains pour que le bruit puisse arriver.

La foudre produit des effets analogues à ceux que l'on peut obtenir avec les batteries électriques; mais on comprend aisément

qu'ils doivent être infiniment plus puissants. Ainsi la foudre vitrifie et réduit en poudre les rochers, fond le fer ; elle tue et déorganise les corps animés ; elle enflamme les substances combustibles, la paille, la poudre, etc. Elle perce les corps peu conducteurs qui se trouvent sur son passage, les murs, par exemple. Elle suit le plus possible les corps conducteurs pour se rendre au sol, où elle creuse ordinairement dans le sable un petit tube dont les parois sont vitrifiées.

L'électricité des nuages se perd souvent sans produire d'orage, soit par un contact lent avec l'atmosphère, soit par les gouttes de pluie qui entraînent le fluide dans le sol.

Paratonnerres. — Francklin, après avoir constaté l'identité de la foudre et de l'électricité, eut l'idée de préserver les bâtiments des atteintes du tonnerre par des appareils destinés à attirer le fluide électrique et à le conduire directement dans le sol ; on le nomme paratonnerres. Le paratonnerre se compose d'une longue tige qui s'élève dans l'air au-dessus du bâtiment qu'on veut préserver et qui est mise en communication avec le sol par une chaîne métallique. Lorsqu'un nuage orageux passe au-dessus, l'étincelle éclate de préférence entre l'extrémité du paratonnerre et le nuage. Lorsque la foudre ne tombe pas, le paratonnerre est encore utile, parce que le fluide contraire à celui du nuage est tiré, et, en échappant par la pointe, contribue à rendre au nuage son état neutre.

Ainsi pendant les moments d'orage on voit souvent l'extrémité des paratonnerres devenir lumineuse.

Les orages arrivent ordinairement dans une direction constante pour le même lieu ; ainsi on a toujours soin de placer aux édifices élevés des paratonnerres suivant une position presque horizontale, dans la direction habituelle des orages, afin de recevoir les décharges provenant des nuages peu élevés.

Dans certains pays les paratonnerres sont terminés par une boule; la charge électrique de la boule peut être supérieure à celle de la pointe, et l'on comprend qu'il puisse en résulter une plus grande attraction sur le fluide du nuage; on ne sait encore laquelle des deux dispositions est préférable.

On admet généralement qu'un paratonnerre peut protéger autour de lui une étendue égale à celle d'un cercle dont le rayon aurait deux fois la hauteur de la pointe.

La chaîne des paratonnerres doit être construite et surveillée avec le plus grand soin, car en cas d'interruption dans la conductibilité, le paratonnerre, au lieu de protéger l'édifice, devient un danger véritable puisqu'il attire la foudre sans pouvoir la conduire dans le sol.

Quant à la communication avec la terre, elle mérite également une grande attention; il ne suffirait pas, par exemple, de faire descendre l'extrémité de la chaîne dans une citerne maçonnée, il faut que tout ce qui l'entoure dans le sol soit bon conducteur, afin de permettre au fluide de se répandre facilement dans le réservoir commun.

La meilleure communication s'obtient en plongeant cette extrémité dans un cours d'eau. A défaut d'eau courante, on la fait plonger dans un puits ou dans le sol, mais à une assez grande profondeur en la divisant en plusieurs branches qu'on entoure de braise.

Choc en retour. — On ressent quelquefois les effets de la foudre à une distance assez considérable des points où s'est produite la décharge électrique. Voici l'explication de ce phénomène qu'on nomme choc en retour. Imaginons un nuage électrisé positivement; il attire sur le sol aux points les plus voisins l'électricité négative et repousse à une certaine distance l'électricité

*

positive. Il s'établit un état d'équilibre qui subsiste tant que le nuage reste à la même place. Mais si la foudre éclate, les électricités négative du sol et positive des nuages se rejoignent, et l'électricité positive refoulée aux environs se répand subitement dans le réservoir commun. Si un corps était ainsi électrisé, il se trouve instantanément déchargé et éprouve les effets qui sont la conséquence du mouvement des fluides électriques.

De la Grêle. — La grêle a sans aucun doute pour origine l'électricité atmosphérique, car on a remarqué que les grêlons sont notablement plus gros pendant les orages qu'aux autres moments.

La vapeur d'eau en se condensant dans l'air peut, par suite d'un refroidissement suffisant, passer à l'état de glace ; si cette formation a lieu entre deux nuages électrisés en sens contraire, on comprend que les grêlons puissent être renvoyés d'un nuage à l'autre par un effet analogue à celui de la danse des pantins ou des balles de sureau. Pendant ces mouvements qui se répètent d'autant plus que les nuages sont plus électrisés, les grêlons peuvent acquérir des dimensions considérables et tombent sur le sol au moment où ils sont trop gros pour être repoussés par le nuage inférieur. Telle est la théorie de Volta, à laquelle on a fait plusieurs objections sans en donner une plus satisfaisante.

Trombes. — Les trombes sont occasionnées par la présence de deux nuages fortement chargés de la même électricité : l'un, se trouvant à une certaine hauteur, repousse sur le sol le second qui, marchant avec rapidité, en perdant peu à peu son électricité par son contact avec le sol, déracine les arbres, fait tournoyer les substances légères et produit les effets dévastateurs que l'on connaît.

Aurores boréales. — Il se produit quelquefois, dans les environs des pôles de la terre, un phénomène singulier auquel on a

donné le nom d'aurore boréale. On l'observe seulement dans de hautes latitudes. Il consiste en une lueur brillante et plusieurs jets de lumière qui s'élèvent du sol et finissent par former deux colonnes lumineuses. Pendant tout le temps que dure une aurore boréale, l'aiguille aimantée éprouve une oscillation qui démontre suffisamment la nature électrique de ce phénomène.

Enfin les tremblements de terre sont ordinairement accompagnés de décharges électriques, mais on ignore encore la relation qui peut exister entre les deux faits.

Influence des orages sur les lignes électriques. — Les orages ont naturellement une grande influence sur les lignes électriques et principalement sur celles dont les fils sont en l'air. Lorsqu'un nuage électrisé passe au-dessus des fils conducteurs, le fil se charge lentement par influence d'électricité contraire, qu'il conserve à l'état latent, tant que le nuage reste à la même distance. Cette électricité ne nuit en rien à la transmission des dépêches. Si le nuage vient à s'éloigner, le fluide devient libre et retourne dans le sol en suivant les fils dans toute leur longueur. Ce mouvement électrique produit, comme nous le verrons plus tard, un courant; mais il est en général trop faible pour être observé dans les postes. Si un éclair éclate entre le nuage et un autre voisin, ou entre le nuage et la terre, le fluide que possédaient les fils conducteurs s'écoule dans le sol, une partie peut s'échapper par les points de suspension, mais la plus grande portion en arrivant aux postes produit les effets ordinaires des décharges électriques, fond les fils fins des appareils et donne des étincelles qui éclatent entre les parties métalliques qui correspondent aux lignes et celles qui communiquent avec la terre. On voit que ce phénomène n'est autre que le choc en retour.

On a constaté que, dans certaines circonstances, une décharge électrique avait lieu entre les fils télégraphiques et les rails de chemin de fer.

Quelquefois la foudre tombe directement sur les fils conducteurs; dans ce cas, le fluide brise les porcelaines qui supportent les fils pour se rendre à la terre par le chemin le plus court, c'est-à-dire par les poteaux sur lesquels il laisse des traces profondes. Plusieurs poteaux sont ordinairement frappés simultanément, quelquefois même le fil est fondu. Une partie du fluide suit le fil dans toute sa longueur, mais elle est assez faible pour qu'on n'ait pas à craindre ses effets dans les bureaux télégraphiques.

Pour protéger les appareils, on se sert de paratonnerres. Ils se composent de deux séries de pointes placées à une faible distance l'une de l'autre; la première se trouve sur le parcours du fil conducteur, et l'autre en communication avec la terre. Quand le fil de la ligne se décharge, le fluide arrive au paratonnerre, et comme il éprouve une assez grande résistance de la part des fils fins des appareils, il passe entre les pointes pour se rendre à la terre par le chemin le plus court.

SOURCES D'ÉLECTRICITÉ.

Nous n'avons encore parlé que du frottement comme moyen d'obtenir l'électricité; mais la décomposition du fluide neutre peut s'opérer par plusieurs autres méthodes. La simple pression de deux corps solides détermine l'électrisation contraire des deux substances. Ainsi, un plateau de verre pressé par du taffetas gommé s'électrise négativement. La pression exercée sur un cristal donne aussi lieu à un développement d'électricité libre.

La chaleur détermine dans certains cristaux une décomposition des fluides électriques; l'une des portions du cristal se charge d'électricité positive, et l'autre d'électricité négative.

Le simple contact de deux corps suffit pour développer de

l'électricité ; ainsi, lorsqu'un disque de zinc et un disque de cuivre sont juxtaposés, le premier est électrisé positivement, et l'autre négativement. C'est cette propriété qui a conduit Volta à la découverte de la pile voltaïque, dont nous parlerons plus tard. Il a été reconnu, toutefois, que la quantité d'électricité développée par le simple contact est infiniment faible, et qu'on doit attribuer plutôt les effets de la pile aux actions chimiques qui s'opèrent entre les corps qui la composent.

Nous citerons donc comme l'une des sources d'électricité les plus importantes, les actions chimiques. Lorsque deux corps se combinent, il se produit toujours un développement d'électricité ; l'un des deux s'électrise positivement et l'autre négativement. Ainsi, quand on plonge une lame de zinc dans l'acide sulfurique étendu d'eau, le zinc se charge d'électricité négative, et l'acide sulfurique d'électricité positive.

La combinaison ne peut même s'effectuer que lorsque ce dégagement d'électricité a lieu. Ainsi pour une lame de zinc plongée dans l'acide sulfurique, il arrive un moment où le zinc et l'acide sulfurique ont une tension suffisante pour qu'elle s'oppose à un nouveau dégagement d'électricité. L'action chimique s'arrête alors, et ne continue que si l'on enlève les deux électricités, ou si l'on rejoint les deux corps par un conducteur métallique, auquel cas la recomposition du fluide neutre a lieu constamment.

Jusqu'ici nous avons presque toujours considéré l'électricité à l'état de repos ou à l'état *statique* ; les décharges électriques, dont nous avons eu occasion de parler, constituent bien un mouvement de l'électricité, mais elles sont tellement instantanées, qu'à part les effets lumineux et calorifiques qu'elles produisent, leurs propriétés sont assez difficiles à étudier. Dans l'autre partie de ce cours, nous envisagerons le fluide électrique en mouvement dans les corps conducteurs et donnant lieu à ce

que l'on nomme courant électrique; mais avant d'y arriver nous devons rappeler la théorie du magnétisme, qui se lie intimement à celle de l'électricité.

MAGNÉTISME.

Propriétés générales. — Le magnétisme est la propriété dont jouissent certains corps, qu'on nomme aimants, d'attirer le fer.

On trouve à la surface de la terre des aimants naturels; *c'est* sont en général des oxydes de fer (combinaisons de l'oxygène avec le fer).

On peut développer les propriétés magnétiques sur un certain nombre de substances, le fer, le nickel et le cobalt; mais le fer est celui qui les prend le plus facilement.

Le fer n'est pas le seul corps sur lequel agissent les aimants; on a, dans ces derniers temps, constaté que toutes les substances sont influencées par le magnétisme; mais en ce qui concerne les applications de la physique, on peut se borner à étudier l'action magnétique sur le fer.

Lorsqu'un barreau aimanté est plongé dans la limaille de fer, cette limaille s'accumule aux deux bouts.

L'attraction s'exerce principalement vers les deux extrémités en deux points qu'on nomme pôles. La partie médiane sur laquelle on n'observe aucune trace de limaille s'appelle ligne neutre.

Lorsqu'un aimant est suspendu à un fil, ou mobile sur un pivot, il prend une direction constante, qui est à peu près celle du méridien. Le même pôle se dirige donc toujours vers le nord, et l'autre vers le sud. On nomme le premier, pôle nord;

et l'autre, pôle sud. Lorsqu'on coupe un aimant en plusieurs parties, chacune d'elles forme un véritable aimant avec deux pôles.

Les aimants agissent les uns sur les autres par attraction et par répulsion. On trouve facilement par l'expérience que les pôles de même nom de deux aimants, c'est-à-dire les pôles qui se dirigent tous les deux vers le nord ou tous les deux vers le sud, se repoussent, tandis que les pôles de nom contraire s'attirent.

Lorsqu'un barreau de fer doux est placé à l'extrémité d'un aimant, il prend les propriétés magnétiques et devient un véritable aimant. On peut s'en assurer en projetant de la limaille de fer ; elle est attirée par l'extrémité de ce barreau, qui agit comme le pôle du premier aimant. L'aimant et le barreau de fer doux ainsi juxtaposés ne forment plus qu'un aimant unique, dont les deux pôles sont situés, l'un à l'extrémité libre du premier aimant, et l'autre à l'extrémité libre du barreau de fer doux.

Dès qu'on opère la séparation des deux corps, le fer doux perd le magnétisme qu'il avait pris momentanément.

Si on remplace le barreau de fer doux par un barreau d'acier, le phénomène change de nature. Au moment où l'on établit le contact entre l'aimant et l'acier, ce dernier ne s'aimante pas comme le fer doux ; mais si le contact persiste, l'acier finit par s'aimanter, et il conserve son magnétisme après qu'on l'a séparé du premier aimant. Il devient alors un aimant véritable, avec deux pôles situés à ses deux extrémités.

Les corps magnétiques se divisent donc en deux catégories distinctes : les uns s'aimantent instantanément au contact d'un aimant, et se désaimantent dès que le contact a cessé ; les autres s'aimantent lentement par le contact, et conservent le magné-

tisme lorsqu'ils sont isolés. On peut faciliter l'aimantation des derniers par divers procédés, comme nous le verrons plus tard.

Dans la première catégorie on ne peut classer que le fer doux, fer chimiquement pur, et qu'on a laissé refroidir lentement.

Hypothèse des fluides magnétiques. — Le magnétisme a une grande analogie avec l'électricité; ainsi un aimant peut être comparé à un cylindre métallique sur lequel on a opéré la décomposition du fluide neutre en agissant par influence au moyen d'un corps électrisé, auquel cas l'un des deux fluides est attiré à l'une des deux extrémités, et l'autre fluide est repoussé à l'autre. Il existe, toutefois, une différence essentielle, puisque si l'on divise l'aimant en deux parties, chacune d'entre elles possède les deux pôles; tandis que si on divise le cylindre en deux parties, l'une contient le fluide positif et l'autre le fluide négatif.

On a donc été conduit à admettre, pour le magnétisme comme pour l'électricité, deux fluides invisibles et impoudérables qui existent sur tous les corps susceptibles d'être aimantés. La réunion de ces deux fluides constitue l'état neutre; l'aimantation est due à leur séparation.

Les molécules de chacun de ces fluides se repoussent et attirent au contraire celles de l'autre fluide.

Ces deux fluides ne se propagent pas sur les corps magnétiques, puisqu'en divisant un aimant en autant de particules que l'on veut chacune conserve ses deux pôles distincts; mais ils sont séparés ou réunis dans chaque molécule, suivant que le corps magnétique est à l'état neutre ou qu'il est aimanté.

Ainsi, en résumé, chaque molécule d'un corps magnétique contient les deux fluides qui restent réunis à l'état ordinaire, mais dont on peut opérer la séparation.

Ges fluides peuvent se mouvoir plus ou moins facilement dans chaque particule, ce qui tient à l'état moléculaire du corps; on comprend donc qu'il puisse être plus ou moins facile d'opérer la séparation des deux fluides, et par la même raison que leur réunion puisse s'effectuer plus ou moins aisément, quand la cause qui avait provoqué la séparation n'existe plus. On a ainsi l'idée de la force coercitive : c'est la résistance qu'offre le corps à la séparation des fluides dans chaque molécule, et qui, par suite, s'oppose à l'aimantation ; c'est la même force qui empêche les deux fluides de se réunir quand ils ont été séparés, et permet d'avoir des aimants artificiels.

Tous les phénomènes magnétiques sont la conséquence de cette hypothèse :

	A	B	C	D	E	F	G	
N	<i>n</i>	<i>s</i>	<i>n</i>	<i>s</i>	<i>n</i>	<i>s</i>	<i>n</i>	<i>s</i>

Considérons un aimant N S divisé en molécules magnétiques A B C, etc. Dans chacune d'elles les fluides que nous nommons fluide nord et fluide sud sont séparés et forment deux pôles *n* et *s*; si l'il n'existe pas de force coercitive, les fluides de chaque particule se rejoindraient et l'état d'aimantation disparaîtrait; mais si cette force existe, la séparation subsiste, et elle se trouve facilitée par l'action des molécules les unes sur les autres; ainsi pour la molécule D, par exemple, le fluide *n* est attiré par le fluide *s* de G, et le fluide *s* par le fluide *n* de E.

Les fluides contraires des molécules voisines, bien qu'ils ne se combinent pas, se neutralisent en exerçant des actions égales et opposées; ainsi donc, si l'on présente au milieu de l'aimant N S un corps magnétique, il n'éprouve aucune action. Aux deux extrémités seulement les fluides sont libres, ce qui conduit à la notion des pôles contraires.

Si l'on considère la série des éléments dans l'ordre de la figure A B C, on voit que pour le premier la séparation des deux fluides n et s n'est maintenue que par l'action du fluide n de B et celle des éléments situés du même côté. Pour le second élément B, cette séparation est maintenue par l'action du fluide n de C et des éléments suivant du même côté, et, en outre, par l'action du fluide s de A; donc la quantité de fluide libre nord et sud est plus grande pour B que pour A. Pour C la séparation des fluides est maintenue par le fluide n de D et les éléments suivant, et, en outre, par l'influence des deux premiers éléments A et B; donc la quantité du fluide libre n et s est encore plus grande pour C que pour B.

Ainsi la quantité de fluide libre de chaque élément augmente à partir des pôles jusqu'au milieu, où elle est la plus forte, puisqu'alors les deux parties de l'aimant agissent ensemble pour maintenir la séparation des fluides.

En nommant n_a n_b n_c et s_a s_b s_c , les fluides des diverses molécules, on voit que n_a est plus petit que n_b $n_b < n_c$ et $s_g < s_f$, $s_f < s_c$. Or, comme $n_a = s_a$, $n_b = s_b$, il s'ensuit qu'au point de contact des éléments A et B les deux fluides ne s'annulent pas complètement, et qu'une partie du fluide n reste libre. Il en est de même au point de réunion des éléments B et C. Le même fait se produit de l'autre côté où il existe du fluide s libre, non-seulement à l'extrémité, mais encore une quantité égale à $s_f - n_g$ au point de contact des éléments F et G, $s_c - n_f$ au contact des éléments E et F, et ainsi de suite.

Lorsqu'on présente un corps magnétique vers l'extrémité d'un aimant, il est attiré par le fluide libre du dernier élément, et, en outre, par le fluide qui reste libre au contact des divers éléments. Toutes ces forces d'attraction agissent comme une seule qui partirait d'un point unique; c'est ce point qu'on nomme pôle, et l'on voit qu'il ne peut se trouver à l'extrémité. Il s'en

éloigne d'autant plus que le barreau est plus long. L'attraction et la répulsion des fluides magnétiques ne s'exercent qu'à des distances infiniment faibles. Ainsi, l'augmentation du fluide libre des éléments n'a lieu que jusqu'à un éloignement assez faible des extrémités ; les pôles sont douc, pour des aimants suffisamment longs, toujours placés à la même distance des extrémités.

Lorsqu'en face d'un aimant tel que N S on place à une très-petite distance un barreau en fer doux, il s'opère par influence une décomposition du fluide neutre dans chaque molécule, comme pour l'électricité. Si le pôle de l'aimant situé en face du corps magnétique est le pôle nord, par exemple, il attire le fluide sud de la première molécule et repousse le fluide nord, qui agit à son tour de la même manière sur la seconde. La même décomposition se reproduit jusqu'à l'extrémité du barreau de fer doux, qui contient du fluide nord à l'état libre, et possède ainsi un pôle nord.

Si l'aimant et le corps magnétique sont en contact, le pôle nord de l'aimant et le pôle sud développé par influence dans le corps magnétique se neutralisent.

Quand le barreau présenté à l'aimant est en acier, la force coercitive s'oppose à la séparation instantanée du fluide ; elle n'a lieu qu'au bout d'un certain temps si le contact persiste, et comme nous l'avons déjà dit, l'aimantation subsiste après la séparation des deux corps.

Nous verrons plus loin que, pour expliquer les actions de l'électricité en mouvement sur les aimants, on a été conduit à admettre une autre théorie pour le magnétisme. Au lieu de supposer dans chaque particule deux fluides distincts, on considère l'aimantation comme produite par des courants électriques circulant autour des molécules ; mais le fait fondamental, c'est-à-dire la décomposition d'un aimant en une infinité de petites particules aimantées ayant deux pôles, subsiste naturellement.

Magnétisme terrestre. — Une aiguille aimantée, suspendue à un fil et libre de tourner autour de son centre, prend une direction constante à laquelle elle revient toujours après une série d'oscillations, quand on l'a écartée de sa position.

Le même phénomène se produit à tous les points du globe, mais la direction n'est pas partout la même; ainsi, plus on approche des pôles, plus l'aiguille tend à s'incliner, tandis qu'aux environs de l'équateur elle est presque horizontale. La terre agit à peu près comme un gros aimant dont les deux pôles seraient situés à peu près aux extrémités de l'axe terrestre. Les deux pôles de la terre portent les noms de pôle boréal et de pôle austral; on donne souvent aux pôles des aimants et même aux deux fluides magnétiques des noms semblables. Le pôle austral est celui qui est attiré vers le pôle boréal de la terre, ou celui que nous avons appelé jusqu'ici pôle nord. Le pôle boréal est celui qui se dirige vers le sud.

Pour déterminer la position d'une aiguille aimantée en un point de la terre, on doit connaître l'angle qu'elle forme avec le plan horizontal, et le plan qu'elle forme vers le plan méridien; le premier se nomme inclinaison, et le second déclinaison.

La boussole de déclinaison se compose d'une aiguille horizontale placée sur un pivot et mobile au-dessus d'un cadran, dont la circonférence est divisée en degrés. On donne à l'aiguille la position horizontale en rendant un des côtés, celui qui s'élèverait si l'aiguille était libre, plus lourd que l'autre. Pour avoir la déclinaison, il suffit de placer le zéro de la boussole dans la direction du nord et de lire l'angle qui forme l'aiguille avec cette direction. La déclinaison est actuellement à Paris de 22° vers l'ouest.

La déclinaison en un lieu de la terre n'est pas constante; ainsi à Paris, elle était de $41^\circ,30'$ vers l'est, en 1580; elle a diminué peu à peu jusqu'au moment où elle a été nulle; l'aiguille s'est

ensuite dirigée vers l'ouest, et la déclinaison a augmenté jusqu'en 1832, où elle était de $22^{\circ}3'$. Ainsi, dans une période de 252 ans, la déclinaison a varié de plus de 33 degrés.

Lorsque l'on examine l'aiguille aimantée avec des instruments délicats, on peut reconnaître que la déclinaison change dans le courant d'une même journée. Elle oscille autour d'une position normale : de 7 heures du matin jusqu'à midi, elle se dirige à l'ouest, et de 3 heures à 9 heures du soir elle revient vers l'est. Les variations diurnes ont une liaison intime avec l'échauffement de la terre sous l'action des rayons solaires.

Le méridien magnétique est le plan vertical qui passe par la direction normale de l'aiguille aimantée.

Malgré ces variations dans la position de l'aiguille aimantée, on peut considérer, pour des lieux qui ne sont pas très-éloignés et à des intervalles de temps qui ne dépassent pas certaines limites, la déclinaison comme constante, et la boussole constitue un instrument précieux pour s'orienter. Il suffit, en effet, d'abandonner la boussole à elle-même et de prendre, pour avoir la direction du nord, un angle de 22° à droite de la direction du côté nord de l'aiguille (qui est ordinairement bleu).

L'inclinaison de l'aiguille aimantée se détermine au moyen d'une boussole verticale, l'aiguille étant libre de tourner autour d'un axe horizontal ; on place d'abord l'aiguille dans le plan du méridien magnétique ; l'angle qu'elle forme avec la ligne horizontale qui passe par le centre du cadran est l'inclinaison.

L'inclinaison varie aux différents points de la terre ; elle est presque nulle aux environs de l'équateur et augmente, en général, à mesure qu'on se rapproche des pôles. Elle est à Paris de 67° environ, et c'est le pôle austral qui s'incline au-dessous de l'horizon. Il existe, du reste, pour l'inclinaison comme pour la déclinaison, des variations lentes et des variations diurnes.

L'action de la terre ne peut être envisagée comme une force unique qui serait attractive ou répulsive. On doit la considérer comme donnant lieu à deux forces égales appliquées aux deux pôles et les tirant en sens contraire; la direction de ces forces est précisément celle de l'aiguille quand elle est orientée.

L'intensité de l'action magnétique de la terre n'est pas la même aux différents points du globe. On peut s'en assurer en faisant osciller une aiguille suspendue par son centre. Lorsque l'aiguille est écartée de sa position d'équilibre, elle y revient, en vertu de l'influence terrestre, et décrit une série d'oscillations, de même qu'un corps suspendu à l'extrémité d'un fil oscille autour de la verticale. Plus la force attractive qui produit les oscillations est considérable, plus elles sont rapides. On a même trouvé par le calcul que les forces sont proportionnelles aux carrés des nombres d'oscillations. En faisant donc osciller une aiguille aimantée et en comptant le nombre d'oscillations qu'elle exécute dans le même temps aux différents points de la terre, on peut apprécier la force magnétique. On a trouvé que cette force va en augmentant depuis l'équateur jusqu'aux pôles, où elle est une fois et demie aussi grande qu'à l'équateur.

En opérant au même lieu et à des époques différentes, on a reconnu que l'intensité magnétique de la terre est soumise, de même que l'inclinaison et la déclinaison, à des variations diurnes. Les expériences doivent évidemment être faites avec la même aiguille, ou avec des aiguilles préalablement comparées, car l'action de la terre sur une aiguille dépend aussi du magnétisme qu'elle possède.

Le même procédé peut être employé pour comparer les aiguilles aimantées et reconnaître l'intensité de leur magnétisme. Si, en effet, on les suspend et si on les fait osciller, les carrés des nombres d'oscillations qu'elles exécutent dans le même temps sont proportionnels aux intensités magnétiques.

Dans toutes les expériences qui sont faites à l'aide des aiguilles aimantées, on doit avoir soin de les mettre à l'abri des substances magnétiques qui peuvent se trouver dans les environs et qui peuvent faire varier les résultats; dans le cas où l'on ne peut écarter ces influences, il faut en tenir compte; c'est ce qu'on est obligé de faire sur les vaisseaux, qui contiennent toujours de grandes masses de fer, et où une erreur dans l'indication de la boussole peut avoir de graves conséquences.

Le magnétisme terrestre ne peut être attribué à des masses magnétiques situées aux deux pôles de la terre, car on ne pourrait expliquer les variations qu'on observe dans la marche des aiguilles. Nous verrons plus tard que les aimants se dirigent sous l'influence des courants électriques, et que l'orientation de l'aiguille est probablement déterminée par des courants circulant autour du globe terrestre, et dont la direction peut varier par des causes encore inconnues.

Lois du magnétisme. — Pour obtenir les lois des attractions et des répulsions des fluides magnétiques, on peut se servir de la méthode des oscillations, dont nous avons déjà parlé. En faisant osciller une aiguille aimantée à diverses distances d'un barreau aimanté, on trouve que les carrés des nombres d'oscillations exécutées dans un même temps, et qui représentent les forces d'attraction ou de répulsion, sont en raison inverse des carrés des distances. Il faut, toutefois, tenir compte dans cette expérience de l'action de la terre, qui s'ajoute à celle du barreau, pour faire osciller l'aiguille.

On peut aussi employer une balance de torsion semblable à celle que l'on emploie pour mesurer les attractions et répulsions électriques.

En faisant osciller une aiguille aimantée horizontale en face d'un aimant vertical, on peut d'après le nombre des oscillations,

exécutées pendant le même temps, aux différentes positions, ^{se} rendre compte de la distribution du magnétisme dans l'aimant.

On trouve ainsi que dans toute la partie médiane le magnétisme libre est nul ; c'est seulement à 8 ou 9 centimètres ^{des} extrémités que l'aiguille commence à osciller, et l'action magnétique augmente jusqu'aux extrémités.

La distribution du magnétisme est donc la même pour ^{tous} les barreaux qui dépassent le double de cette longueur ou 18 ^{cet} centimètres, et par conséquent la position des pôles est identique ; ils se trouvent à peu près à 40 millimètres des extrémités. ^{Pour} les aimants d'une plus faible longueur, la distance des piles ^{aux} extrémités diminue avec la longueur du barreau.

Points conséquents. — Un barreau aimanté peut avoir ^{quel} quefois plus de deux pôles ; il suffit d'imaginer deux aimants ^{qui} on réunit par les deux pôles semblables, les pôles nord ^{par} exemple ; on forme ainsi un système ayant un pôle nord ^{au} milieu, et deux pôles sud aux deux extrémités. Un pareil ^{ép} peut se présenter dans un barreau quand on ne l'aimante ^{pas} régulièrement ; mais il ne peut persister parce que les fluides ^{semblables} qui sont en présence se repoussent, et tendent ^à faire disparaître le magnétisme.

Désaimantation. — Un barreau aimanté, lorsqu'il est ^{aban} donné à lui-même, tend à perdre son magnétisme. D'après ^{la} théorie donnée plus haut sur le magnétisme, on voit en effet que le fluide nord ou sud qui se trouve libre à l'extrémité ^{de} l'aimant est attiré par le fluide contraire de la même molécule, et n'est retenu que par la force coercitive ; à la longue, les deux fluides finissent par se combiner, et l'aimantation disparaît. ^{Si} en face de l'aimant on place un barreau en fer doux, ce barreau s'aimante ; le fluide libre de l'aimant attire le fluide ^{cor}por

traire du barreau, et l'attraction qui en résulte s'unit à la force coercitive pour maintenir l'aimantation.

On place donc toujours en face des barreaux aimantés, pour conserver leur magnétisme, des plaques de fer doux; on les nomme armatures.

On donne souvent aux aimants la forme d'un fer à cheval; une seule armature réunit les deux pôles, et tend à maintenir l'état magnétique de l'aimant.

Procédés d'aimantation. — Un barreau de fer doux placé dans le voisinage d'un aimant s'aimante, comme nous avons vu, par influence. Un barreau d'acier s'aimante également, mais seulement au bout d'un certain temps, et reste aimanté.

La terre agit comme un aimant; un barreau s'aimante donc lorsqu'il est placé dans la direction de l'aiguille aimantée, et les pôles qu'il prend sont naturellement placés comme ceux de l'aiguille. Lorsqu'on retourne le barreau, s'il est en fer doux, le sens de l'aimantation change; s'il est en acier, il conserve quelque temps son magnétisme, qui disparaît peu à peu pour changer de sens. On développe par ces deux procédés une puissance magnétique très-faible. Pour obtenir des aimants puissants, il faut agir par le frottement.

On prend, par exemple, un barreau d'acier sur lequel on fait glisser toujours dans le même sens le pôle d'un aimant. Le barreau s'aimante, et l'extrémité que l'aimant quitte prend un pôle de nom contraire à celui de l'aimant.

Si l'on ne frottait pas le barreau dans toute sa longueur, si, par exemple, on arrêtait le frottement au milieu du barreau, on déterminerait en ce point un pôle qui serait un point conséquent. On augmente encore le magnétisme développé en promenant sur

le barreau et en sens contraire, en partant du milieu, les pôles contraires des deux aimants.

Plus les aimants sont puissants, plus la quantité de magnétisme développée est considérable. Il existe toutefois une limite à partir de laquelle cette quantité cesse d'augmenter; on dit alors que le barreau est saturé de magnétisme. Quant à la limite de saturation, elle dépend de la force coercitive du corps soumis à l'expérience. L'acier trempé est celui qui a la force coercitive la plus considérable; cette force est d'autant plus grande qu'il est plus fortement trempé.

On sait que pour tremper l'acier il faut le chauffer au four ^{et} le refroidir brusquement, et que la force de la trempe dépend ^{de} l'élévation de température à laquelle on l'a soumis.

Les aimants, lorsqu'ils sont chauffés, perdent leur magnétisme. La chaleur a donc pour effet de diminuer la force coercitive. Pour rendre à un barreau d'acier son magnétisme lorsqu'il l'a perdu, il faut le tremper de nouveau et le frotter avec un ^{air} aimant, comme nous avons dit plus haut.

SOURCES D'ÉLECTRICITÉ.

Nous avons vu dans la première partie de ce cours deux moyens de produire l'électricité: le frottement de deux corps, qui développe sur l'un d'eux le fluide positif et sur l'autre le fluide négatif, et l'action à distance d'un corps électrisé sur un autre corps, qui opère la séparation des deux fluides sur le dernier. Il existe d'autres sources d'électricité dont nous allons parler.

Pression. — La simple pression de deux corps solides compressibles ou élastiques est une de ces sources; ainsi un disque de métal isolé et non vernis étant pressé sur du taffetas gommé

s'électrise négativement, tandis qu'au contraire il s'électrise positivement si on le frotte avec le même corps. Un plateau de verre poli s'électrise aussi négativement s'il est pressé sur du taffetas gommé.

Les cristaux, quand ils sont comprimés, s'électrisent également, et peuvent même conserver plusieurs jours leur électricité libre.

L'électricité ne peut naturellement se manifester que lorsque les deux corps sont séparés ; la quantité qui reste libre dépend de l'intensité de la pression et de la rapidité avec laquelle la séparation a lieu.

La chaleur modifie ces phénomènes ; ainsi certains cristaux qui s'électrisent positivement par la pression à la température ordinaire, se chargent, au contraire, d'électricité négative quand on élève la température.

Lorsqu'on sépare deux lames d'un cristal tel que le mica, ou qu'on dédouble une carte, les deux parties sont ordinairement électrisées ; la cause en est sans doute la même que celle qui produit le développement d'électricité dans la pression, et qu'on doit bien distinguer de l'électrisation due au frottement.

Chaleur. — Certains cristaux, lorsqu'on les soumet à l'action de la chaleur, s'électrisent ; l'un des côtés se charge de fluide positif, et l'autre de fluide négatif ; il se forme donc deux pôles distincts : l'un positif, et l'autre négatif. Si l'on brise le cristal en deux parties, chacune conserve les deux pôles, exactement comme un aimant qui peut se diviser en deux aimants distincts.

Nous verrons plus tard un autre genre d'action de la chaleur qui donne lieu à des courants électriques.

Électricité due au contact. — Le simple contact de deux corps suffit pour décomposer le fluide neutre ; ainsi deux disques,

l'un de cuivre et l'autre de zinc, étant placés l'un sur l'autre, le premier se charge d'électricité négative, et le second d'électricité positive. On peut le constater au moyen d'un électroscopie très sensible.

La quantité d'électricité ainsi développée est extrêmement faible. Aussi le contact, considéré comme source électrique, n'a qu'une importance beaucoup plutôt historique que réelle ; c'est à lui qu'on doit la première idée des piles électriques, et nous devons entrer à ce sujet dans quelques détails.

C'est en 1790 que furent découverts les premiers faits relatifs à l'électricité dynamique. Galvani reconnut qu'on obtenait des convulsions dans une grenouille récemment privée de la vie en réunissant les muscles et les nerfs par un arc métallique composé de plusieurs métaux, comme on en obtient par une décharge électrique au moyen d'une machine ou d'une bouteille de Leyde. Volta, pour expliquer ce phénomène, admit que le contact des deux métaux produisant une charge électrique de sens différent sur chacun d'eux, la réunion des deux fluides par le corps de la grenouille, donnait lieu aux mouvements convulsifs observés par Galvani. L'expérience confirma cette hypothèse jusqu'à un certain point. Partant de ce fait, Volta eut l'idée de former plusieurs couples semblables de deux métaux, en les séparant par un corps bon conducteur, et n'ayant aucune action sur les deux métaux. Il forma ainsi un assemblage auquel il donna le nom de pile voltaïque. Nous reviendrons plus loin sur la théorie de la pile.

Le corps choisi pour séparer les différents couples était du drap découpé en rondelles et imbibé d'eau acidulée, l'acide n'ayant aux yeux de Volta d'autre but que celui de rendre l'eau plus conductrice. La pile étant isolée, l'une des extrémités est chargée d'électricité positive : c'est celle qui se termine par le zinc, et l'autre d'électricité négative. Les deux extrémités portent

les noms de pôles ; l'une est le pôle positif, et l'autre le pôle négatif.

Électricité due aux actions chimiques. — La quantité d'électricité développée par la pile voltaïque est très-faible lorsque les rondelles sont imprégnées d'eau, tandis que lorsque l'eau est acidulée, elle devient beaucoup plus considérable. On a donc été conduit à se demander si l'acide n'agissait pas par son action sur le zinc plus que le contact des deux métaux pour développer l'électricité, et cette assertion a été pleinement justifiée. Beaucoup de physiciens admettent même que le simple contact ne peut déterminer aucune décomposition du fluide neutre, et qu'il faut une réaction chimique pour base de toute pile.

L'expérience fondamentale de Volta consistait à tenir à la main la partie zinc d'un système de deux plaques zinc et cuivre soudées ensemble, et à présenter le cuivre au plateau d'un électromètre qui accusait des traces d'électricité. Mais cette électricité pouvait être développée au contact de la main humide et du zinc ; l'action produite sur l'électromètre devient en effet nulle quand on tient le zinc avec une pince en bois ; elle est au contraire très-énergique si l'on verse une goutte d'acide sulfurique sur le zinc.

Beaucoup d'expériences directes prouvent d'ailleurs la production de l'électricité sous l'influence des actions chimiques. Ainsi une lame de zinc plongée dans l'acide sulfurique étendu d'eau se charge d'électricité négative, tandis que l'acide s'électrise positivement. Il y a plus : deux corps ne peuvent se combiner qu'à la condition que le développement d'électricité puisse avoir lieu.

Si deux corps A et B, acide sulfurique et oxyde de zinc, par exemple, sont en contact, le premier se charge d'électricité positive, et le second, d'électricité négative, et la tension électrique augmente sur ces deux corps jusqu'au moment où elle est

assez grande pour s'opposer à une nouvelle production d'électricité. L'action chimique s'arrête alors d'elle-même, et les deux corps peuvent rester en présence sans se combiner de nouveau.

Si l'on enlève le fluide positif développé sur A et le fluide négatif développé sur B, une nouvelle combinaison peut s'effectuer à la surface de contact des deux corps, et une nouvelle production d'électricité a lieu.

Si l'on réunit A et B par un corps conducteur, les fluides développés se rejoignent, et la production d'électricité pouvant continuer en même temps que la réaction chimique, il se produit un mouvement d'électricité permanent dans le conducteur. C'est ce mouvement électrique auquel on a donné le nom de courant.

Il faut, bien entendu, que le conducteur qui relie A et B soit d'une nature différente ; ainsi, si B est du zinc, le conducteur intermédiaire pourra être du cuivre. S'il était en zinc, il se chargerait également des deux côtés d'électricité négative, et la formation du fluide neutre ne pourrait avoir lieu.

Quand le corps B, que nous supposons solide, tandis que A est liquide, contient à sa surface quelques parties qui n'ont pas d'action sur A ; quand, par exemple, B est du zinc, et qu'il a du charbon en quelque point de sa surface, ce charbon joue naturellement le même rôle que le corps que nous supposons tout à l'heure réunir les deux corps ; il se forme un courant électrique, et l'action chimique n'a plus de raison pour s'arrêter.

C'est pour cette cause que le zinc ordinaire plongé dans l'acide sulfurique se dissout entièrement en décomposant l'eau pour s'unir à l'oxygène et à l'acide sulfurique, et former du sulfate de zinc. Si le zinc était parfaitement pur, l'action chimique durerait un instant très-court, et le zinc resterait électrisé négativement, tandis que l'acide le serait positivement. Lorsqu'on

trempe le zinc dans le mercure, opération qu'on désigne sous le nom d'amalgamation du zinc, il se recouvre à la surface d'une pellicule très-mince de mercure qui rend l'action chimique uniforme, et les choses se passent comme nous venons de le dire.

THÉORIE DE LA PILE.

Considérons deux corps, M et N, qui par leur contact donnent lieu à une production d'électricité, que la cause d'ailleurs en soit due au simple contact ou à l'action chimique. L'un des deux corps, M, se charge d'une certaine quantité d'électricité positive, et l'autre, N, d'une quantité égale d'électricité négative.

Désignons par a la tension de l'électricité développée sur les deux corps, $+ a$ pour M et $- a$ pour N. Elle dépend de la nature des deux corps, ou de l'énergie de l'action chimique. Elle ne dépend nullement de l'étendue de la surface de contact; car ce qui s'oppose à un nouveau développement d'électricité est non pas la quantité absolue du fluide déjà produit, mais la répulsion qu'exercent les molécules les unes sur les autres, qui varie seulement avec la tension.

Ainsi donc si l'ensemble des deux corps M et N est isolé, le corps M contiendra de l'électricité positive, et sa tension sera $+ a$, et le corps N de l'électricité négative à la tension $- a$. La quantité totale d'électricité dépendra d'ailleurs de l'étendue des corps M et N.

Si l'on place ensemble M N sur un plateau isolé et électrisé positivement à une certaine tension p , les fluides développés par le contact sur M et N se combineront au fluide libre du plateau, et la tension sera sur M, $p + a$, et sur N, $p - a$. La différence de tension entre M et N est donc $2a$, quelle que soit la quantité d'électricité produite par une cause étrangère.

Enfin, supposons que N communique avec la terre ; sa tension est évidemment nulle, et celle de M est alors $+ 2a$. Si, au contraire, M communiquait sur la terre, sa tension serait o et celle de N, $- 2a$. Ces divers cas sont représentés dans le tableau suivant :

M	N
$+ a$	$- a$
$p + a$	$p - a$
$+ 2a$	o
o	$- 2a$

Supposons maintenant qu'on réunisse les deux corps M et N par un fil conducteur ; les deux fluides en vertu de leur force expansive ou de leur tension s'échapperont dans le fil, et reconstitueront le fluide neutre. Il se formera, comme nous l'avons déjà dit, une nouvelle quantité d'électricité au contact des corps M et N, et le mouvement électrique continuera dans le conducteur ; ^{ce} aura ce qu'on nomme un courant électrique.

La force ou l'intensité de ce courant doit dépendre naturellement de la force avec laquelle les fluides sont repoussés dans le conducteur, c'est-à-dire des tensions $+ a$ et $- a$. Il dépend aussi, comme nous le verrons plus tard, de la longueur, de la section et de la conductibilité du fil que doit traverser l'électricité, et il est clair qu'il faut tenir compte aussi de la résistance qu'il éprouve à traverser les corps M et N eux-mêmes.

On nomme force électro-motrice la différence de tension $2a$ que produit le contact des corps M et N. Le courant produit par deux couples différents, quand le conducteur intermédiaire reste le même, est proportionnel à cette différence $2a$, ou à la force électro-motrice.

Jusqu'ici nous avons considéré un seul couple, M N; nous

allons maintenant en supposer deux : M N et M' N'; si ces deux couples étaient juxtaposés, le corps N se trouverait placé entre deux corps de même nature M et M', de sorte que, si le système était isolé, la tension de M serait $+\alpha$,

celle de N	$-\alpha$
M'	$+\alpha$
N'	$-\alpha$

En ajoutant indéfiniment des couples, la tension serait alternativement $+\alpha$ et $-\alpha$, et ne dépasserait jamais cette limite.

Il faut donc séparer les couples par un corps qui n'ait pas d'action sur M et N, ou du moins dont l'action soit beaucoup plus faible. Soit R ce corps, et supposons que son contact avec M et N ne puisse développer d'électricité; on aura ainsi le système suivant :

M N R M' N'

Si les deux corps M et N sont de l'acide sulfurique et du zinc, R sera du cuivre. D'après l'hypothèse de Volta, les deux corps développant l'électricité étaient du zinc et du cuivre, et le corps neutre R était une rondelle de drap imbibée d'acide sulfurique.

Lorsque N' communique avec la terre, sa tension est nulle, et celle de M' est $+\alpha$. Le fluide positif développé par le contact M' N' se répand sur les trois corps R N et M; R et N ont donc aussi pour tension électrique $+\alpha$, et cette tension s'accroît de α au contact de M et de N; elle est par conséquent $+\alpha$ pour M. Ainsi la tension à l'extrémité libre de la pile est double de ce qu'elle est lorsqu'elle se compose d'un seul couple. Si la pile est isolée, il est aisé de voir que la tension doit être $-\alpha$ sur N' et $+\alpha$ sur M.

$$\begin{array}{rcc}
 M & \overbrace{N R M'} & N \\
 + 4a & + 2a & o \\
 + 2a & o & - 2a
 \end{array}$$

Si, au lieu de deux couples, on en considérait trois, on aurait de la même manière la distribution de la tension électrique dans la pile :

$$\begin{array}{rcc}
 M & \overbrace{N R M'} & \overbrace{N' R' M''} & N \\
 + 6a & + 4a & + 2a & o \\
 + 3a & + a & - a & - 3a
 \end{array}$$

Le dernier disque N'' communiquant avec la terre, sa tension est nulle ; elle est $2 a$ sur les disques M'' , P'' et N' , leur contact ne donnant lieu à aucune force électro-motrice ; elle est $4 a$ sur M' , P et N , et enfin $6 a$ sur M . Si la pile est isolée, la tension est $- 3 a$ sur N' et $+ 3 a$ sur M .

Il en est de même si, au lieu de trois couples, on en considère un nombre quelconque n . La tension est $2 na$ sur le disque isolé, quand la pile est en communication avec la terre par l'autre extrémité ; si la pile est isolée, la tension est $- na$ à l'une des extrémités, et $+ na$ à l'autre.

On voit donc, en résumé, que la tension développée aux extrémités de la pile est proportionnelle au nombre des éléments, et qu'elle ne dépend pas de leur étendue. On nomme force électro-motrice de toute la pile, la différence des tensions aux deux extrémités, qui n'est autre que la somme des forces électro-motrices des différents couples.

Ce que nous venons de dire concerne seulement la pile à l'état statique, c'est-à-dire lorsque l'une des deux extrémités au moins est isolée et que, par conséquent, il ne peut y avoir de courant.

Quand on réunit les deux extrémités par un fil conducteur, les deux fluides passent dans le fil en vertu de leur force expansive, et il se produit un courant qui dure autant que l'action chimique. Nous verrons plus tard les lois qui régissent l'intensité du courant ; on peut la déduire des principes que nous avons posés par des considérations analogues à celles qui précédent ; mais nous nous bornerons à faire observer que cette intensité doit dépendre de la tension totale développée, qui est proportionnelle au nombre des éléments, et de la résistance des corps que doit parcourir le fluide électrique.

On nomme les deux extrémités de la pile, pôles ; celui qui s'électrise positivement quand la pile est isolée est le pôle positif, l'autre est le pôle négatif. Quand on attache un fil conducteur à chacun des pôles d'une pile, les deux extrémités de ces fils se nomment électrodes. Ce nom peut aussi s'appliquer aux deux pôles.

Lorsqu'on réunit les deux pôles et que le courant s'établit, il n'y a pas de raison pour admettre que le mouvement électrique ait plutôt lieu dans un sens que dans l'autre ; mais afin de fixer les idées et de pouvoir définir facilement un courant, on convient de regarder, dans le fil qui réunit les deux pôles, le courant comme allant du pôle positif au pôle négatif dans le conducteur qui les relie.

Il faut remarquer que le mouvement électrique doit aussi avoir lieu dans la pile, mais il a lieu du pôle négatif au pôle positif. Le fluide neutre étant en effet décomposé par le couple qui se trouve au pôle négatif, l'électricité négative est repoussée dans le conducteur interpolaire, tandis que le fluide positif passe dans la pile pour aller à l'élément voisin, où se produit la même action. Le fluide positif marche donc dans l'intérieur de la pile du pôle négatif au pôle positif, de façon à former un circuit complet, partant du pôle négatif pour y revenir en traversant la pile, le pôle positif et le conducteur interpolaire.

Lorsque la substance destinée à séparer les divers couples exerce une action sur l'un des corps élémentaires, elle donne lieu à un courant qui peut être de même sens, ou de sens contraire au courant principal; dans le premier cas, le courant définitif est la somme des deux autres, et dans l'autre cas il est égal à leur différence.

Nous allons maintenant examiner les différentes dispositions qui ont été adoptées pour les piles.

DISPOSITIONS DIVERSES DES PILES.

Pile à colonne. — La première pile construite par Volta se composait d'une série de disques de cuivre et de zinc soudés ensemble deux à deux. Ces doubles disques, placés les uns au-dessus des autres et séparés par des rondelles de drap imbibées d'acide sulfurique, constituent la pile à colonne. Le dernier cuivre forme le pôle négatif, et le dernier zinc le pôle positif. Volta admettait que le développement d'électricité était dû au contact du cuivre et du zinc; mais, comme nous l'avons vu, on doit considérer comme cause unique, l'action de l'acide sulfurique sur le zinc.

On peut ainsi placer un très-grand nombre d'éléments les uns sur les autres et développer une tension considérable. Toutefois, dans cette pile, les couples supérieurs pressant, par leur poids, sur les rondelles humides, en chassent l'acide, et au bout de peu de temps elle cesse de fonctionner.

Pile à auge. — La pile à auge se compose d'augets remplis d'acide sulfurique étendu d'eau et séparés les uns des autres par des disques de zinc et de cuivre. On voit que cette pile est la même que la précédente; les éléments au lieu d'être rangés verticalement le sont horizontalement. De plus, les deux dernières plaques ne sont ordinairement composées que d'un seul métal. Le

développement d'électricité n'ayant pas lieu au contact des deux métaux, mais bien à celui de l'acide et du zinc, il est inutile d'ajouter un disque de cuivre après le zinc qui est en contact avec l'acide au dernier élément, et un disque de zinc ou cuivre qui se trouve à l'autre pôle.

Le pôle positif est donc alors l'acide ou plutôt le cuivre qui termine la pile, et le pôle négatif est la dernière lame de zinc.

Pile de Wollaston. — Elle se compose de tasses contenant de l'acide sulfurique étendu d'eau ; les plaques sont fixées à une traverse qu'on peut éléver ou abaisser à volonté. Dans chaque couple le cuivre se recourbe autour de la plaque de zinc, ce qui augmente la surface par laquelle il peut recevoir l'électricité.

Les deux plaques qui plongent dans le liquide ne doivent donc pas se toucher ; le cuivre est relié sur la traverse au zinc de l'élément précédent, et le zinc au cuivre de l'élément suivant.

On peut, en abaissant ou en élevant la traverse, mettre à volonté la pile en action, et la conserver indéfiniment en état de pouvoir fonctionner à un instant quelconque.

Piles sèches. — Elles diffèrent des piles précédentes en ce qu'il n'entre dans leur composition que des corps solides, ou du moins très-légèrement humides. Elles sont formées de disques très-minces de cuivre et de zinc séparés par du papier imbibé d'huile, ou de feuilles de papier argenté d'un côté et de l'autre saupoudré d'oxyde de manganèse.

En accouplant ainsi un très-grand nombre d'éléments, on obtient une pile d'une tension assez forte et qui conserve très-long-temps ses propriétés électriques. Quant au courant produit par ces piles, il est à peine sensible, parce que l'action chimique est extrêmement faible.

On contourne quelquefois la pile de façon à relever verticalement ces deux pôles ; si alors on place au centre une aiguille mobile sur un pivot et portant à son extrémité un disque de clinquant qui puisse toucher les extrémités de la pile, l'aiguille prend un mouvement de rotation continu qui persiste pendant longtemps. Le disque, en effet, attiré par le pôle positif, se charge au contact de fluide positif ; il est repoussé et vient se décharger sur le pôle négatif, qui le repousse à son tour.

Variations du courant dans les piles. — Les piles hydro-électriques que nous venons de décrire, pile à colonnes, à auge et pile de Wollaston, lorsqu'on réunit les deux pôles par un corps conducteur, donnent un courant dont la force diminue rapidement.

Cette variation dans l'intensité tient à deux causes principales : en premier lieu, le zinc qu'on emploie contient toujours à la surface des impuretés ; il existe des points sur lesquels l'acide agit avec moins d'énergie que sur les autres, et même peut ne pas exercer d'action. Il se forme alors, comme nous l'avons expliqué précédemment, de petits courants secondaires qui s'opposent à ce que le fluide passe dans le conducteur principal.

La seconde cause tient à la nature de l'action chimique elle-même. Le zinc, en présence de l'eau et de l'acide sulfurique, décompose l'eau, s'empare de son oxygène pour former avec l'acide sulfurique du sulfate de cuivre, et laisse l'hydrogène en liberté.

Ce gaz, sous l'action du courant, comme nous le verrons en étudiant les propriétés chimiques du courant électrique, se porte sur la lame de cuivre qui forme le pôle positif de l'élément, et finit par l'entourer complètement. On désigne ce phénomène sous le nom de polarité électrique. La gaine isolante d'hydrogène finit par s'opposer au passage du courant, qui cesse entièrement au bout d'un temps assez court.

On peut remédier à la première de ces causes de la diminution de l'intensité du courant en amalgamant le zinc, ce qui rend l'action chimique uniforme. Pour amalgamer le zinc on commence par le décapier en le trempant dans l'acide sulfurique ; on le plonge ensuite dans un vase rempli de mercure et l'on frotte la surface avec une brosse très-dure.

Quant à la polarité des lames métalliques, pour l'empêcher, il suffit de faire plonger la lame de cuivre ou en général la lame positive dans un autre liquide que l'acide sulfurique, qui puisse absorber l'hydrogène à mesure qu'il vient de porter sur cette lame. Il faut que ce second liquide, et l'acide sulfurique qui produit la réaction chimique, puissent communiquer sans se méler. On emploie à cet effet des vases en terre poreuse, qui atteignent parfaitement le but qu'on veut atteindre.

Pile de Grove. — Le liquide employé pour empêcher la formation de l'hydrogène à l'état gazeux est l'acide azotique, qui lui abandonne une partie de son oxygène et se transforme en acide hypoazotique. Quant à la lame négative, elle ne peut être en cuivre, qui serait attaqué par l'acide azotique ; on emploie une lame de platine.

Cette pile se compose donc d'un vase en verre contenant de l'acide sulfurique, et dans lequel on place la lame de zinc amalgamé. Un vase poreux placé dans l'intérieur du précédent, contient de l'acide azotique, et on fixe au centre une lame de platine. On réunit plusieurs éléments en attachant la lame de platine de chacun d'eux au zinc de l'élément suivant. On place quelquefois le zinc et l'acide sulfurique dans le vase poreux, le platine et l'acide azotique dans le vase extérieur.

Pile Bunsen. — Elle diffère uniquement de la précédente en ce que le platine est remplacé par du charbon. Le zinc et l'acide sulfurique sont disposés dans le vase poreux ; le charbon est or-

dinairement un cylindre qui entoure le vase poreux et plongé dans l'acide azotique que contient le vase en verre. Pour former l'électrode négatif, on entoure le charbon d'un cercle de cuivre muni d'une borne métallique dans laquelle on passe un fil de cuivre attaché au zinc de l'élément suivant.

Au lieu de former le charbon en cylindre, on préfère quelquefois lui donner la forme d'un prisme qui plonge dans le vase en terre, et est réuni par une lame de cuivre au zinc de l'élément suivant.

La théorie de cette pile est la même que celle de la pile de Grôve. Le zinc décompose l'eau, et, avec l'oxygène et l'acide sulfurique, produit du sulfate de zinc. L'hydrogène se porte sur l'électrode négatif, c'est-à-dire sur le charbon, où il décompose l'acide azotique, il s'empare d'une partie de son oxygène et reforme l'eau, et il reste libre de l'acide hypoazotique, qui se dégage en vapeurs rouges. La double action chimique qui se produit donne à ces piles une grande énergie.

Pile Daniell. — Dans cette pile, le liquide qui entoure l'électrode positif, au lieu d'être de l'acide azotique comme dans les précédentes, est du sulfate de cuivre. Le zinc plongeant dans l'acide sulfurique produit encore un courant en décomposant l'eau, et, formant du sulfate de zinc, l'hydrogène se porte sur l'électrode positif entouré de sulfate de cuivre. Ce dernier sel, sous l'action du courant et de l'hydrogène, se décompose; l'acide sulfurique est attiré sur l'électrode négatif; il passe donc dans le compartiment qui contient l'acide sulfurique; quant à l'oxyde de cuivre, il se réduit. L'oxygène s'unit à l'hydrogène et reconstitue l'eau; enfin le cuivre se dépose sur l'électrode positif, qui ordinairement une lame de cuivre. Le résultat final est donc la décomposition du sulfate de cuivre, le dépôt du cuivre à l'état métallique, et la formation de sulfate de zinc.

La pile Daniell se compose, par conséquent, d'un vase poreux

rempli d'acide sulfurique dans lequel on place le zinc amalgamé, et ce vase poreux est lui-même déposé dans un vase en verre contenant une dissolution de sulfate de cuivre. Pour conserver à la pile sa constance, il suffit de placer au fond du vase en verre des cristaux de sulfate de cuivre qui maintiennent la dissolution à l'aide de saturation.

On renverse souvent l'ordre des corps dans la pile, en donnant au zinc amalgamé la forme d'un cylindre entourant le vase poreux ; le sulfate de cuivre est alors déposé dans le dernier.

Dans la pile Daniell qu'on emploie pour les télégraphies, on met de l'eau pure à la place d'acide sulfurique dans le vase en verre qui contient le cylindre de zinc. L'action est plus lente à se produire ; mais une fois que la pile est en activité, la réaction chimique est la même, puisque nous avons vu que l'acide sulfurique se formait sous l'action même du courant. De plus, on n'amalgame pas le zinc, afin de simplifier la manipulation ; l'action du zinc sur le sulfate de cuivre est assez faible pour qu'il n'en résulte pas un trop grand inconvénient.

On a donné beaucoup d'autres dispositions aux piles, mais nous nous bornons aux précédentes, qui suffisent pour en faire comprendre la théorie générale, et sont d'ailleurs les plus employées.

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE ET PROPRIÉTÉS DU COURANT ÉLECTRIQUE.

Lorsque l'électricité est en mouvement dans un corps conducteur, elle constitue l'être dynamique, et jouit de propriétés remarquables. Nous avons déjà cité les effets calorifiques et lumineux que produisent les décharges électriques ; les effets du courant sont naturellement du même genre ; mais à cause de la persistance du mouvement électrique on peut les étudier plus facilement, et l'on a pu reconnaître d'autres propriétés qui eussent échappé

aux recherches des savants sans la découverte de la pile voltaïque.

Propriétés physiologiques du courant. — Quand on touche avec les deux mains les deux pôles d'une pile, on ressent une commotion d'autant plus forte que la tension de la pile est plus considérable, et par conséquent que le nombre des couples est plus grand. Les piles à colonne, qu'on peut, sous un petit volume, composer d'un très-grand nombre d'éléments, sont très-favorables pour produire ces commotions.

Lorsque l'on fait partie d'un circuit électrique en tenant deux fils aboutissant aux pôles de la pile, on ressent la commotion au moment où le courant s'établit et au moment où il cesse. Pour augmenter l'action des commotions en les répétant à de courts intervalles, on se sert d'une roue interruptrice : c'est une roue qui porte à sa circonference des lames alternativement métalliques et isolantes. Toutes les lames conductrices communiquent entre elles et avec l'axe de rotation qu'on relie à l'un des pôles de la pile. Un ressort appuie sur la circonference et est relié à l'autre pôle. Lorsque l'on tourne la roue, le courant s'établit quand le ressort passe sur une partie métallique, il se rompt quand le ressort passe sur une partie isolante. Si l'on coupe le fil qui relie le ressort à l'un des pôles de la pile pour tenir les deux bouts à la main, on ressent de vives commotions quand la roue tourne, surtout si les deux bouts sont terminés par deux cylindres métalliques qui augmentent la surface de contact.

Les commotions agissent très-diversement sur les personnes suivant leur constitution ; on a cherché à appliquer ces commotions à la guérison de certaines maladies, la goutte, la paralysie, etc., et l'on a réussi dans beaucoup de cas ; toutefois, le rôle que l'électricité doit jouer dans la médecine n'est pas encore bien fixé.

Toute propriété du courant électrique peut servir à la compo-

sition d'un télégraphe; il suffit, en effet, d'avoir à une station une pile électrique et un certain nombre de fils allant de cette station à une station suivante; en faisant passer le courant un certain nombre de fois et à des intervalles variables, on peut former facilement un vocabulaire et transmettre une correspondance quelconque. On a donc eu l'idée de profiter de l'action physiologique du courant pour constater son passage. Que l'on suppose en effet aux cinq doigts de la main cinq anneaux formés de deux parties métalliques isolées par de l'ivoire, ces cinq anneaux correspondant à cinq circuits différents; chaque passage du courant par l'un des fils produira une petite commotion en traversant le doigt correspondant au fil, et cette commotion sera l'indice du signal.

Propriétés calorifiques. — Lorsqu'un courant traverse un fil, il l'échauffe; si le fil est très-fin, il le rougit, et peut même le fondre et le volatiliser. Quand la chaîne qui relie les deux pôles est composée de plusieurs métaux, ils s'échauffent, mais inégalement; ainsi les plus fins rougissent plus que les autres. C'est surtout au contact des métaux différents qu'a lieu la plus grande élévation de la température, ce qui doit faire admettre que l'échauffement tient à la résistance qu'éprouve le fluide pour passer d'une molécule à une autre dans le même corps, ou d'un corps à un autre d'une nature différente.

Effets lumineux. — Lorsque l'on fait communiquer les deux fils métalliques avec les pôles d'une pile, et que l'on rapproche ces deux fils à une très-petite distance, on voit une petite étincelle. La tension électrique développée par les piles est infinitiment moindre que celle que l'on peut obtenir à l'aide des machines électriques: aussi ne peut-on obtenir d'étincelles qu'à des distances extrêmement petites. Ces étincelles sont produites par le transport de molécules qui se fait d'un fil à l'autre et qui sont échauffées jusqu'au rouge par l'action calorifique du courant. La

couleur des étincelles varie en effet avec la nature des métaux employés.

Lorsque les fils sont remplacés par deux cônes de charbon *et* que la pile est suffisamment puissante, le même phénomène *se* produit et donne lieu à une flamme très-brillante due, comme nous venons de le dire, au passage d'un électrode à l'autre des particules de charbon qui rougissent à la température élevée que produit le courant. Le charbon qui communique avec le pôle positif s'use rapidement, tandis que l'autre augmente au *contraire* de volume. Il y a de plus une perte du charbon lorsque l'expérience *se*, fait dans l'air ou dans l'oxygène, et qui est due à l'oxydation du charbon. C'est cette lumière que l'on cherche à utiliser comme moyen d'éclairage, et que l'on a déjà souvent employée dans des circonstances particulières.

On n'a pas encore obtenu un succès complet, parce que l'on n'est pas parvenu à régler convenablement le rapprochement des charbons ; dès que leur distance dépasse une certaine limite, la lumière disparaît. S'ils s'usaient régulièrement, il suffirait de les rapprocher au moyen d'un mécanisme d'horlogerie ; mais l'intensité de la pile varie constamment, et bien que ces variations aient lieu dans des limites très-restréintes, elles suffisent pour modifier l'usure des charbons.

On a construit plusieurs régulateurs fondés sur l'action attractive que les courants hélicoïdaux exercent sur les aimants, *et* que nous étudierons plus loin ; ils sont disposés de telle sorte, qu'une diminution dans l'intensité du courant amène le rapprochement des charbons, et réciproquement. On n'est pas parvenu à un résultat assez satisfaisant pour faire entrer l'éclairage électrique dans le domaine de l'application, sauf dans des circonstances exceptionnelles.

ÉLECTRO-CHIMIE.

Propriétés chimiques du courant. — Lorsque l'on fait plonger dans l'eau les extrémités de deux fils communiquant avec les deux pôles d'une pile, on voit l'eau se décomposer. Des bulles de gaz se dégagent aux deux électrodes, et, si on les recueille dans deux petites cloches en verre, on reconnaît que l'oxygène de l'eau se porte à l'électrode positif, et l'hydrogène à l'autre. Dans l'espace intermédiaire, aucune bulle ne se dégage. Pour rendre l'eau plus conductrice, on lui ajoute ordinairement un peu d'acide sulfurique. Ainsi, l'hydrogène marche dans le sens du courant, tandis que l'oxygène marche en sens contraire.

Le courant électrique, lorsqu'il est suffisamment intense, peut réduire presque tous les corps composés; il a même servi à découvrir certains corps simples que leur grande affinité pour l'oxygène ne permettait pas d'avoir par d'autres procédés. Ainsi, la potasse, la soude, etc., sont décomposées sous l'influence du courant; le potassium et le sodium se transportent à l'électrode négatif, et l'oxygène à l'électrode positif. Pendant longtemps on n'a pas eu d'autre moyen d'obtenir ces deux corps à l'état métallique.

Dans toutes les combinaisons où il entre de l'oxygène, ce corps, sous l'action du courant, se transporte à l'électrode positif.

Théorie électro-chimique. — Pour expliquer les effets chimiques de la pile, on admet que chaque molécule d'un corps simple se trouve dans un état électrique particulier, ou possède une certaine quantité d'électricité qui lui est inhérente. La nature du fluide et la quantité possédée par chaque corps est différente et dépend de sa nature.

L'oxygène, qui est attiré, comme nous venons de le voir, par

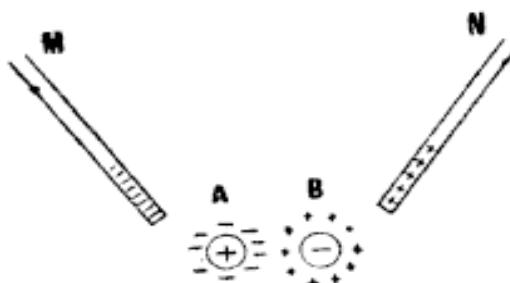
le pôle positif, possède l'électricité négative ; en d'autres termes, c'est un corps électro-négatif.

Les autres corps qui sont attirés par le pôle négatif sont au contraire électro-positifs.

Lorsque les corps sont à l'état naturel, l'électricité qui fait partie de leur constitution n'est pas sensible, parce qu'elle agit sur le fluide neutre environnant et attire la surface de chaque molécule de l'électricité contraire à celle qu'elle possède, ce qui produit une neutralisation analogue à celle qui a lieu dans une bouteille de Leyde chargée. On peut donc considérer chaque molécule d'un corps simple comme entourée d'une atmosphère de fluide contraire à celui qui fait partie de sa constitution.

Cette manière d'envisager les corps permet d'expliquer la formation d'électricité dans les réactions chimiques, et l'action du courant sur les corps composés. Nous allons indiquer cette théorie pour les cas les plus simples, parce qu'elle fixe bien les idées sur la nature des phénomènes.

Considérons deux molécules, A et B, de deux corps simples



différents : l'une électro-positive, A ; l'autre électro-négative, B. Ces deux molécules attirent à leur surface, la première du fluide

négatif, et l'autre du fluide positif, qui leur forment une sorte d'atmosphère électrique.

Quand ces deux molécules sont en présence, les atmosphères électriques empêchent la combinaison tant qu'une cause étrangère ne vient pas rompre l'équilibre. Ainsi, l'oxygène et l'hydrogène peuvent se trouver mélangés dans le même vase sans se combiner; mais si l'on fait passer une étincelle électrique, elle détermine une secousse qui probablement écarte les atmosphères et détermine la combinaison, et, par suite, la formation de l'eau. La molécule résultant, A B, est électro-positive si l'électricité *a* que possède A est plus grande que celle *b* de B, et électro-négative dans le cas contraire. Les atmosphères électriques se réunissent également et dans la même proportion.

Ainsi, un corps composé peut être, comme un corps simple, électro-positif ou électro-négatif. Les bases et les oxydes sont électro-négatifs, tandis que les oxydes sont électro-positifs. Lorsque *a* est égal à *b*, la molécule (A B) qui résulte de la combinaison des deux éléments est à l'état neutre; les atmosphères se neutralisent aussi complètement.

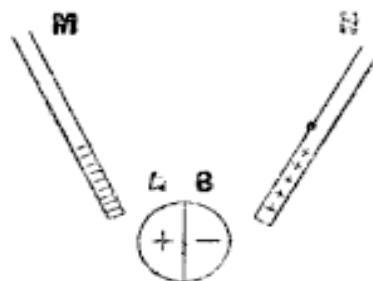
Lorsque les molécules A et B sont en communication avec deux corps conducteurs, M et N, les atmosphères peuvent passer sur ces corps, et rien ne s'oppose à la combinaison des deux molécules élémentaires. Les deux corps M et N se chargent, le premier d'électricité négative, et le second d'électricité positive.

Si, préalablement, M était électrisé négativement, et N positivement, les deux conducteurs, au lieu de faciliter la combinaison, s'opposeraient au dégagement des atmosphères et maintiendraient au contraire les molécules séparées.

Après ce qui précède, il est facile d'expliquer le dégagement d'électricité produit dans les piles électriques. Imagin-

nous deux corps d'une certaine étendue et assez bons conducteurs, X et Y, dont l'un soit électro-positif, et l'autre électro-négatif. X est, par exemple, de l'oxyde de zinc, et Y de l'acide sulfurique. Les molécules qui sont en présence à la surface de séparation s'attirent et, par leur combinaison, forment un sel; les atmosphères se répandent sur les deux corps qu'elles électrisent, X négativement et Y positivement; le sel se dissout, et de nouvelles molécules se trouvant en contact abandonnent également leurs atmosphères aux corps X et Y. Il arrive un moment où la tension électrique des corps X et Y est assez grande pour empêcher un nouveau dégagement des atmosphères électriques, et la réaction s'arrête. Elle ne continue que si l'on enlève les fluides répandus sur M et N, ou si l'on réunit ces deux corps par un fil conducteur, auquel cas les deux fluides passent dans ce fil et reconstituent le fluide neutre. On obtient ainsi, comme nous l'avons vu, un courant électrique.

Cette même théorie permet d'expliquer la décomposition d'un corps que produit le courant électrique. Considérons, en effet, une molécule, A et B, produite par la combinaison des molécules

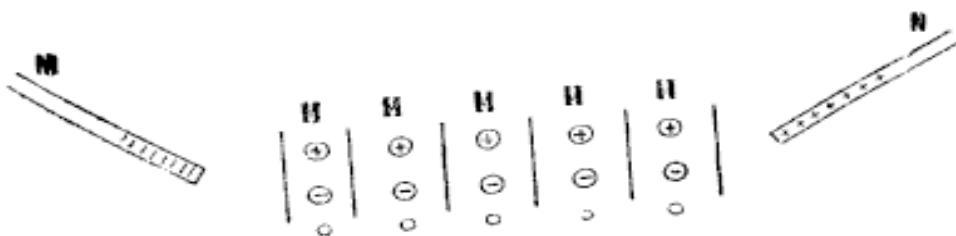


simples A et B : l'une, A, électro-positive, et l'autre, B, électro-négative. Si l'on présente deux conducteurs, M et N, électrisés, le premier négativement, et le second positivement, ces deux corps étant, par exemple, deux électrodes reliés aux pôles

d'une pile, et si la tension électrique est suffisante, l'attraction qu'exercent ces deux conducteurs sur les fluides naturels de A et de B est plus forte que l'attraction qui résulte de l'affinité chimique des deux molécules, et la décomposition a lieu.

La molécule A est attirée par M, et la molécule B par N. Le fluide négatif de M se répand autour de A, et reconstitue son atmosphère électrique. La molécule se trouve donc à l'état naturel. Si elle est solide, elle se dépose sur M, et augmente son volume; si elle est gazeuse, elle peut adhérer; mais d'autres molécules se produisant viennent s'ajouter et former une bulle qui, par sa légèreté, s'échappe pour gagner la partie supérieure du liquide, au milieu duquel l'action se produit.

Il reste à expliquer comment entre les deux électrodes on n'aperçoit aucune bulle de gaz. Supposons que le corps à décomposer soit de l'eau, et considérons une file de molécules situées entre les deux électrodes M et N; chacune de ces molécules en

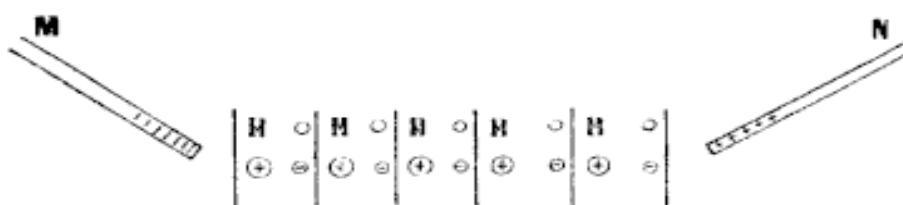


comprend deux élémentaires : l'une, d'hydrogène électro-positive H, et l'autre d'oxygène électro-négative O.

L'électrode positif agissant par influence sur la première molécule d'eau, la tourne de manière à rapprocher l'oxygène et à éloigner l'hydrogène. La première molécule agit de même sur la

seconde, la seconde sur la troisième, et ainsi de suite jusqu'à la dernière, dont l'hydrogène se tourne vers l'électrode négatif.

On a donc la disposition suivante des molécules :



Dans cet état, chaque molécule élémentaire d'oxygène ou d'hydrogène est soumise à deux forces contraires : la force chimique qui tend à maintenir la combinaison, et la force électrique qui tend à la détruire. Lorsque la dernière l'emporte, l'oxygène de la première molécule se sépare de l'hydrogène, et se dégage à l'électrode ; l'hydrogène, devenu libre, se porte sur la molécule suivante qu'elle décompose, s'unit à son oxygène, et rend libre l'hydrogène qui produit le même effet sur la molécule suivante, et ainsi de suite jusqu'à l'autre électrode, où se dégage l'hydrogène de la dernière molécule.

On voit donc qu'il y a une série de décomposition et de reconstitution des molécules de l'eau, et que les deux gaz ne peuvent se trouver libres qu'aux deux extrémités.

Quant à la transmission des fluides électriques, elle n'a pas lieu de la même manière que dans les conducteurs métalliques ; toute l'électricité produite par la pile est employée à rendre aux molécules dégagées leur état normal en reconstituant leur atmosphère électrique. La quantité d'eau décomposée est donc propor-

tionnelle à la quantité d'électricité qui passe dans le liquide. L'intensité du courant étant la quantité de courant qui traverse un conducteur pendant l'unité de temps, cette intensité peut être mesurée par la quantité d'eau décomposée pendant l'unité de temps.

Nous allons étudier maintenant les différents faits qui résultent de la théorie précédente, et les applications qui en résultent.

Électro-chimie. — Nous venons de voir que quand l'eau est décomposée, l'oxygène se porte toujours à l'électrode positif, et l'hydrogène à l'électrode négatif. Si le métal qui forme l'électrode positif est oxydable, il se combine avec l'oxygène, qui alors ne se dégage plus. L'hydrogène se porte sur l'électrode négatif ; l'affinité de l'hydrogène pour les métaux est très-faible : aussi n'y a-t-il pas de combinaison quand l'électrode est à l'état métallique ; mais si cet électrode est un oxyde, l'hydrogène le décompose pour s'emparer de l'oxygène, et laisse le métal libre. Quand le corps est un acide ou un oxyde, l'oxygène se porte toujours au pôle positif ; la décomposition exige quelquefois une assez grande intensité du courant.

Lorsque le liquide traversé par le courant contient un sel en dissolution, la décomposition du sel a lieu ; l'acide se porte au pôle positif, et l'oxyde au pôle négatif. L'oxyde est décomposé lorsqu'il n'est pas une base puissante, et l'oxygène se porte en même temps que l'acide au pôle positif, tandis que le métal se rend seul au pôle négatif. Ainsi, pour le sulfate de cuivre, par exemple, le cuivre se dépose sur l'électrode négatif, tandis que l'acide sulfurique et l'oxygène se portent à l'électrode positif. Si cet électrode est formé d'un métal facilement oxydable, tel que le fer, le zinc, le cuivre, etc., l'oxygène forme avec cet électrode un oxyde qui s'unit à l'acide pour constituer un nouveau sel. Ainsi, lorsque le courant traverse une dissolution de sulfate de cuivre et que l'électrode positif est en fer, le cuivre se porte à l'électrode négatif, et il se forme à l'électrode po-

sitif du sulfate de fer qui se dissout dans le liquide. Si l'électrode positif est en cuivre, il se forme du sulfate de cuivre qui se dissout également, de sorte que la liqueur reste toujours au même degré de saturation. Le cuivre continue à se déposer sur l'électrode négatif, et le résultat définitif est le transport du cuivre de l'électrode positif sur l'électrode négatif.

Polarité électrique. — Nous avons cité la polarité électrique comme une des causes qui s'opposent à la constance des piles ; elle consiste en ce que le courant produit dans la pile une décomposition analogue à celle qui a lieu dans un conducteur liquide extérieur ; ainsi pour une pile formée d'une série d'éléments comprenant chacun une lame de cuivre, un vase rempli d'acide sulfurique et une lame de zinc, le courant marche dans l'intérieur de la pile du zinc au cuivre ; l'eau se décompose donc, et l'hydrogène marchant en sens contraire du courant vient se déposer sur la lame de cuivre, et arrête la conductibilité. On remédie à cet inconvénient, ainsi que nous l'avons dit, en plaçant les deux lames de zinc et de cuivre dans deux liquides différents.

Voltamètre. — La réduction des corps composés par le courant fournit un moyen très-simple de comparer la force des courants ou de savoir la quantité d'électricité qui traverse un conducteur. On nomme voltamètre l'instrument qui sert à cette détermination.

Il se compose d'un vase en verre, au fond duquel arrivent deux petits fils conducteurs ; deux petites cloches en verre graduées sont disposées au-dessus de ces fils, de façon à recevoir les gaz qui se dégagent. Si l'on fait passer le courant dans cet appareil en mettant les deux fils métalliques dans un circuit, on a, par le volume de gaz produit, la mesure exacte de la quantité d'électricité qui a traversé l'appareil. Si deux courants électriques donnent des volumes différents de gaz dans le même temps, les intensités des courants sont proportionnelles à ces

volumes. On sait que le volume d'hydrogène doit toujours être double du volume d'oxygène.

Au lieu d'employer l'eau, on peut prendre un sel métallique quelconque, du sulfate de cuivre par exemple ; et si les deux électrodes sont en cuivre, on a une vérification très-simple. En effet, le cuivre réduit par le courant se dépose sur l'électrode négatif et, par conséquent, le poids augmente ; l'oxygène et l'azote, transportés à l'électrode positif, reconstituent avec le métal le sulfate de cuivre ; la lame positive doit donc perdre un poids égal à celui que gagne la lame négative. Avec ce voltamètre, les intensités du courant sont proportionnelles aux poids gagnés et perdus par les lames pendant un temps donné.

Galvanoplastie. — L'électro-chimie a reçu dans ces derniers temps une application très-étendue ; elle fournit, en effet, un moyen très-simple de recouvrir les corps conducteurs d'une couche métallique aussi légère qu'on veut.

Imaginons un vase contenant du sulfate de cuivre, dans lequel plonge un objet quelconque, en fer par exemple, et une lame de cuivre, le premier étant relié au pôle négatif de la pile et la lame au pôle positif. Nous avons vu que le sulfate de cuivre se décompose et que le cuivre se dépose à l'électrode négatif, tandis que le métal de l'électrode positif se dissout. Au bout d'un certain temps, l'objet en fer est donc recouvert d'une couche de cuivre qui, d'abord très-légère, devient plus épaisse à mesure que l'action dure plus longtemps.

Pour recouvrir un corps conducteur d'un métal quelconque, il suffit donc de former avec ce métal un sel soluble, et de faire plonger dans la dissolution un électrode positif de même métal, l'objet à recouvrir formant l'autre électrode. Ainsi, pour argenter ou doré un objet de cuivre, on emploie du chlorure d'argent ou

d'or, dans lequel on fait plonger une masse d'argent ou d'or l'objet qu'on veut dorer.

Lorsque l'objet à recouvrir n'est pas conducteur, on le ~~recouvre~~ préalablement d'une légère couche de plombagine, qui ne ~~détruit~~ en rien les formes et le rend conducteur.

Cette méthode fournit un moyen de prendre des empreintes de reproduire certains objets en métal d'une grande délicatesse comme des médailles. On verse sur le type qu'on veut produire de la gutta-percha fondu, qui sèche en remplissant très-exactement les vides du modèle. On peut alors l'en dégager et, en la saupoudrant de plombagine et la soumettant à un bain galvanoplastique, on reproduit très-fidèlement le ~~premier~~ objet.

Application à la télégraphie. — Sämmerring a eu le ~~premier~~ l'idée d'appliquer l'électro-chimie à la télégraphie. L'appareil récepteur était une cuve pleine d'eau légèrement acidulée, ~~où~~ née de vingt quatre pointes d'or espacées au fond du vase portant chacune une lettre. Vingt-quatre fils métalliques ~~é~~tant de ces pointes aboutissaient à la pile située à une certaine distance. Un vingt-cinquième fil, aboutissant à une pointe supplémentaire, et invariablement fixé à l'un des pôles, servait ~~à~~ fil de retour.

En faisant passer le courant par l'un quelconque des ~~vingt~~ quatre fils, une bulle se dégageait à la pointe d'or correspondante et faisait connaître la lettre transmise.

On est revenu plus tard aux télégraphes électro-chimiques que l'on a réalisés dans de bien meilleures conditions. Imaginons une dissolution d'iodure de potassium traversée par le courant : la potasse est transportée à l'électrode négatif, tandis que l'iode

se rend au pôle positif ; si cet électrode est en fer, il se forme de l'iodure de fer dont la couleur se reconnaît facilement. Si donc un papier est imbibé d'une dissolution d'iodure de potassium, et qu'un stylet en fer communiquant avec le pôle positif appuie dessus, tandis que de l'autre côté il se trouve en communication avec le pôle négatif, le courant déterminera la formation d'iodure de fer, et laissera une trace sur le papier, qu'on aura soin de faire dérouler d'un mouvement uniforme, ou de faire tourner au-dessous du stylet. Il comportera donc la marque de points et de traits à chaque passage du courant, suivant la durée de ces passages.

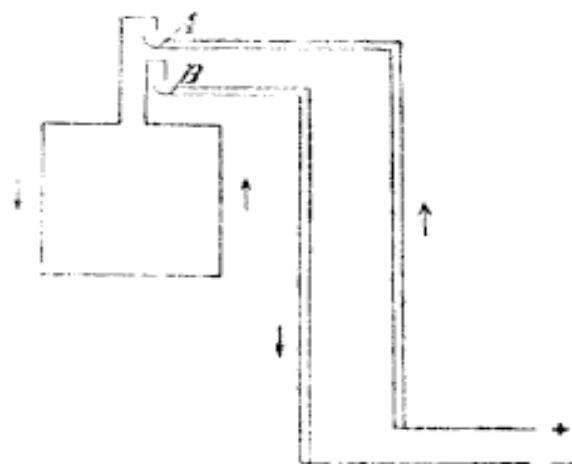
Les traces laissées par l'iodure de fer sont très-faibles, et ne persistent pas, tandis que le cyanure de fer a une belle couleur bleu foncé. On a donc été conduit à préférer à l'iodure de potassium le cyanure jaune de potassium. Le principe est le même, mais la réaction chimique est un peu différente.

Le papier doit être employé à l'état humide, et c'est un des plus grands obstacles à la réussite des télégraphes électro-chimiques. On a bien proposé divers moyens pour lui conserver son humidité ; plusieurs ont assez bien réussi, mais pas assez complètement pour faire abandonner les appareils dont les signaux se font avec de l'encre ordinaire.

ÉLECTRO-DYNAMIQUE.

Courants mobiles. — Les courants agissent les uns sur les autres par attraction et répulsion. C'est à Ampère qu'on doit la découverte de ce genre de phénomènes dont l'ensemble constitue l'électro-dynamique. Pour les observer il faut évidemment qu'un des deux courants au moins soit mobile, ce qu'on peut réaliser de plusieurs manières.

Concevons en effet deux colonnes verticales recourbées à droite, comme l'indique la figure ci-dessous, et terminées



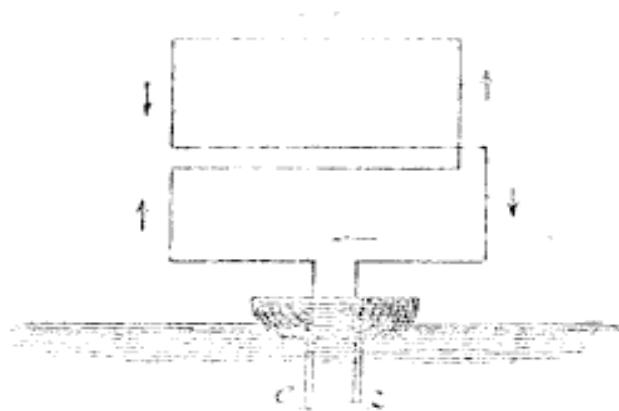
deux petites cuvettes remplies de mercure A et B. Si l'on fil contourné d'une façon quelconque et terminé par deux pointes placées l'une au-dessus de l'autre à la même distance que les deux cuvettes de l'appareil, on pourra faire plonger les pointes dans les cuvettes, et le conducteur restera suspendu, condition qu'il puisse se tenir en équilibre autour de la cale qui passe par les deux pointes, ce qu'on peut toujours tenir au moyen d'un petit contre-poids quand il est nécessaire.

Les deux colonnes sont fixées sur une table qui porte communications métalliques. En mettant l'une d'elles en communication avec le pôle positif de la pile et l'autre avec le pôle négatif, le conducteur suspendu est traversé par un courant dont on peut changer à volonté le sens au moyen de commutateurs placés sur la table; le conducteur, reposant sur des pointes plongées dans deux cuvettes de mercure, est mobile autour de la verticale qui passe par ces deux pointes, et l'on peut facilement étudier l'action qu'exerce sur lui un courant qui approche ou qu'on éloigne.

On peut avoir aussi un courant mobile en fixant un conducteur à un flotteur en liège posé sur une cuve pleine d'eau, et en faisant arriver le courant par deux fils très-fins qui n'opposent pas de résistance au mouvement du flotteur.

Enfin on se procure encore des courants mobiles en fixant à un flotteur deux lames, l'une de zinc et l'autre de cuivre; un fil part de l'une des lames, traverse le liège, et retourne à l'autre lame en décrivant la figure qu'on veut donner au courant. Si l'on place cet appareil dans un grand vase contenant de l'acide sulfurique, il se forme un véritable élément de pile ordinaire, dont le courant part de la lame de cuivre pour aller à l'autre en traversant le conducteur. Le liège flottant sur le liquide, on a un courant mobile dans tous les sens et qui permet d'étudier les lois d'attraction et de répulsion des courants les uns sur les autres.

Action électro-dynamique des courants. — On trouve, en abandonnant à lui-même un conducteur rectangulaire ou circulaire, qu'il se dirige de lui-même sous l'action de la terre; son plan se place normalement à la direction de l'aiguille aimantée, et dans la branche inférieure le courant marche de l'est à l'ouest. Lorsqu'on veut étudier l'action des courants les uns sur



les autres, il faut donc soustraire le courant mobile à cette action. On y arrive facilement en le composant de deux rectangles disposés de façon à être parcourus en sens contraire par le courant, comme l'indique la figure ci-dessus. Les faits principaux qu'on observe sont les suivants :

Quand on présente à un courant mobile un second courant parallèle, il y a attraction si les courants ont le même sens, et répulsion s'ils vont en sens contraire.

Si l'on recourbe le conducteur fixe de façon à former deux conducteurs voisins parcourus en sens contraire par le même courant, il n'y a ni attraction ni répulsion ; on peut donc dire que la force d'attraction qu'exerce un courant sur un autre est égale à la répulsion qu'on obtient quand on change le sens de l'un des courants.

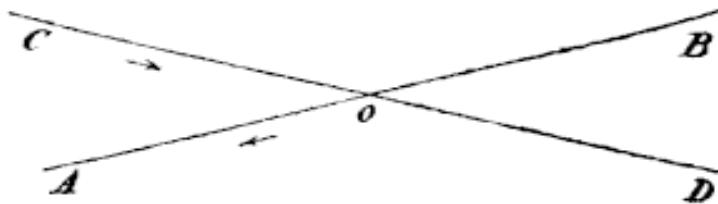
Lorsque deux courants tels que A B et C D sont obliques, ils



s'attirent s'ils marchent tous les deux vers le sommet de l'angle ou s'ils s'en éloignent tous les deux. Ils se repoussent au contraire quand l'un deux marche vers le sommet tandis que l'autre s'en éloigne. Le même phénomène a lieu lorsque les deux courants ne sont pas dans le même plan.

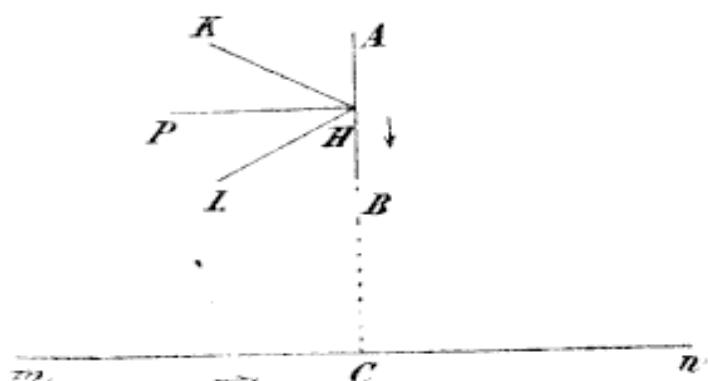
On peut déduire de ces lois la plupart des phénomènes électro-dynamiques. Nous allons en citer quelques exemples. Supposons deux courants obliques tels que A o B et C o D ; le courant marchant de B en A dans le premier et de C en D pour le second.

la portion G o est repoussée par A o et attirée par o B ; o D est



repoussé par o B et attiré par o A ; si les courants sont mobiles, ils tourneront donc de façon à s'appliquer l'un sur l'autre, o G sur o B et o D sur o A . Si les deux courants ne sont pas dans le même plan, ils tournent de façon à se placer parallèlement.

Considérons maintenant un conducteur fixe indéfini horizontal m n , et un second; A B , mobile et perpendiculaire au premier, l'électricité marchant de m en n dans le premier, et de A en B dans le second. Le courant A B est attiré par la portion m G du

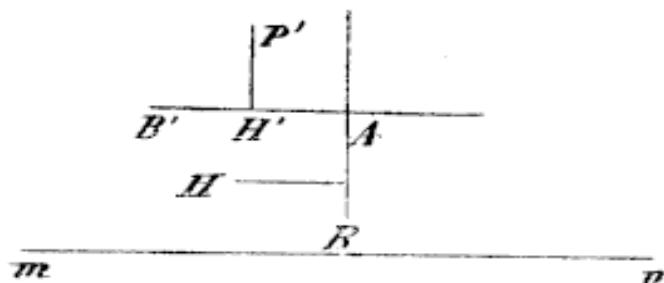


courant fixe, suivant une certaine direction H L . Il est repoussé par l'autre partie G n suivant une direction symétrique H K et avec une force égale. Les deux forces agissent évidemment comme une seule H P , qui serait parallèle à m n . Le courant A B se transporte donc parallèlement à lui-même dans la direction H L , c'est-à-dire parallèlement au courant m n , et en sens contraire

de ce courant. Si le sens du courant changeait, le mouvement aurait lieu en sens contraire ; il en serait de même si le conducteur A B se trouvait de l'autre côté de $m n$. Le même phénomène aurait lieu si les deux courants, au lieu d'être dans le même plan, étaient dans des plans parallèles.

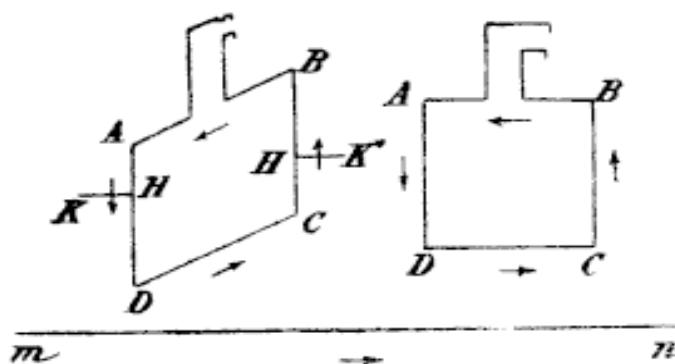
Si le courant A B n'était pas entièrement du même côté par rapport au conducteur $m n$, s'il le coupait, la translation n'aurait plus lieu, le courant mobile tournerait comme nous l'avons déjà dit pour se placer parallèlement à $m n$.

Considérons encore comme exemple un courant A B fixé en A et pouvant par conséquent tourner autour de ce point, et un courant indéfini $m n$, le courant marchant de A en B et de m en n. A B est poussé comme dans l'exemple précédent dans la direction H P ; mais comme le point A est fixe,



A B tourne et vient se placer dans la direction A B'. Il est alors repoussé par un courant $m n$ suivant H' P', puisque les deux courants sont parallèles et sont parcourus en sens contraire par l'électricité ; il continue donc à tourner pour se placer sur le prolongement de A B ; il est alors perpendiculaire à $m n$ et se trouve poussé dans le sens du courant, de m en n ; il tourne encore. Enfin dans la dernière position, il est attiré par le courant parallèle $m n$, et la rotation continue. On obtient donc par ce moyen un mouvement continu de rotation d'un courant autour d'un point.

Action d'un courant indéfini sur un courant fermé. — Nous allons étudier maintenant l'action d'un courant horizontal rectiligne indéfini sur un conducteur fermé traversé par un courant. Soit $m\ n$ le conducteur fixe, A B C D le conducteur fermé, la flèche indiquant le sens des courants. La branche A D est perpendiculaire à $m\ n$ et le courant se dirige vers le conducteur fixe;

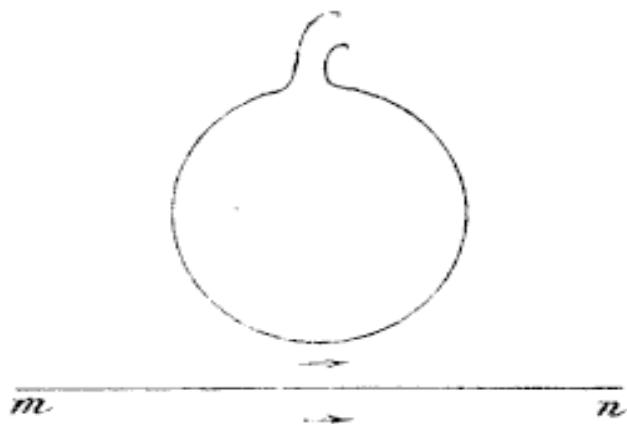


cette branche est donc poussée dans la direction H K, c'est-à-dire parallèlement à $m\ n$, et en sens contraire du fluide dans ce conducteur. B C est au contraire poussé dans la direction contraire H' K'. La branche C D tend à tourner pour se placer parallèlement à $m\ n$, les deux courants devant avoir la même direction. Quant à la branche A B, elle tend à se mouvoir en sens contraire de D C. Si donc le conducteur $m\ n$ se trouve à une petite distance de D C, l'action sur D C sera plus grande que sur A B; si au contraire le courant $m\ n$ est à une assez grande distance par rapport à l'éloignement des branches D C et A B, les deux effets s'annuleront, et il suffira de tenir compte de l'action $m\ n$ sur les branches verticales A D et B C. On voit en somme que le cadre tend à tourner pour se placer dans le même plan que $m\ n$, la partie inférieure devenant parallèle à $m\ n$, et étant parcourue par le courant dans le même sens que le conducteur fixe. Ce fait peut être vérifié par l'expérience.

Courants curvilignes. — Outre les trois lois que nous avons indiquées plus haut, on peut citer les deux autres qui ont été trouvées également par Ampère.

L'action d'un courant sinueux est la même que celle d'un courant rectiligne terminé aux deux mêmes points. Pour le démontrer il suffit de prendre un fil recourbé sur lui-même, de façon à avoir une branche droite et l'autre sinuuse, le fil étant entouré de soie pour empêcher le courant de passer d'une branche à l'autre. On trouve que ce système est sans action sur un courant voisin, d'où il faut conclure que les parties courbes ont la même influence que les parties rectilignes.

Ce fait montre qu'on peut remplacer un conducteur courbe par un conducteur rectiligne, ou réciproquement. Si donc un courant fixe $m\ n$ et un conducteur circulaire traversés par deux courants sont en présence, l'effet sera le même que si le dernier était remplacé par un rectangle. Le courant circulaire tend



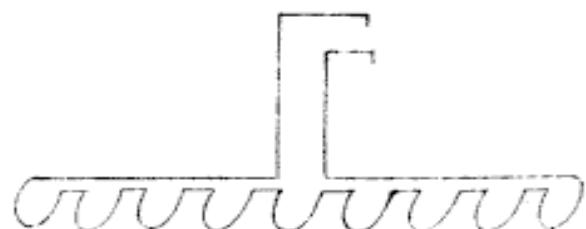
donc à tourner pour se placer dans le plan de $m\ n$, de façon que le courant à la partie inférieure ait la même direction que dans $m\ n$.

Action répulsive des particules de courant. — L'autre ¹⁰¹

consiste en ce que les parties d'un même courant tendent à se repousser. Ainsi dans un conducteur traversé par un courant, il y a en chaque point une tendance à la séparation des parties ; cette tendance est trop faible pour qu'on puisse l'observer en général, mais on peut la constater au moyen d'un appareil imaginé par Ampère. Il se compose d'une petite cuvette en porcelaine, divisée en deux compartiments qu'on remplit de mercure. Un conducteur en cuivre recourbé plonge dans les deux compartiments et se trouve supporté par le mercure. On fait communiquer le pôle positif de la pile avec l'un des compartiments, et le pôle négatif avec l'autre ; le circuit se complète par le conducteur mobile. On le voit alors se mouvoir parallèlement à la cloison, ce qui indique une répulsion entre la partie du courant qui traverse le mercure et celle qui traverse le fil.

Nous avons déjà cité un exemple d'un mouvement de rotation continue qu'on peut obtenir par l'action d'un courant fixe sur un courant mobile ; on peut en obtenir d'autres du même genre par diverses dispositions, mais il est inutile de les décrire ici.

Solénoides. — Nous avons vu qu'un courant rectangulaire ou circulaire mobile, mis en présence d'un courant fixe rectiligne, se place de façon à se trouver dans le même plan que le second, le courant ayant la même direction dans le conducteur fixe et dans la partie inférieure du courant mobile. On peut imaginer une série de cercles parallèles fixés les uns aux autres et traversés dans le même sens par le courant. La figure suivante indique comment on peut réaliser ce système et le rendre mobile ;



il est formé d'un fil dont les deux extrémités peuvent être plongées dans les deux cuvettes pleines de mercure de l'appareil que nous avons décrit plus haut; ce fil est recourbé, et forme une série de cercles parallèles dont l'ensemble se nomme solénoïdes.

Si l'on présente au-dessous de ces cercles un conducteur fixe, ils tournent, et l'ensemble tend évidemment à se placer perpendiculairement au conducteur fixe, le courant ayant à la partie inférieure des cercles la même direction que dans le conducteur. On peut aussi obtenir un solénoïde en enroulant simplement un fil en hélice.



Action de la terre. — Un courant fermé, rectangulaire ou circulaire, mobile se dirige par l'action seule de la terre. Il se place de façon que son plan soit perpendiculaire à la direction de l'aiguille aimantée, et le courant dans la partie inférieure marche de l'est à l'ouest. On voit donc que la terre agit comme si elle était parcourue par un grand courant qui circulerait de l'est à l'ouest. On nomme pôle nord du solénoïde l'extrémité qui se dirige vers le nord, et l'autre est le pôle sud.

Analogie des aimants et des solénoïdes. — L'action de la terre est la même sur un solénoïde que sur un aimant, mais là ne s'arrête pas l'analogie; on peut facilement démontrer par l'expérience que les pôles contraires de deux solénoïdes s'attirent, tandis que les pôles semblables se repoussent. Ce fait est dû

reste une conséquence des lois que nous avons indiquées : en effet, si l'on place deux solénoïdes l'un à la suite de l'autre, les pôles contraires seront en présence si les courants ont la même direction dans les cercles ; donc ils s'attireront, puisque deux courants parallèles et de même sens s'attirent. Dans le cas contraire ils se repousseront.

Cette analogie frappante a donné lieu à une hypothèse nouvelle sur le magnétisme. L'aimantation ne serait plus produite par deux fluides différents résidant dans le fer, mais elle tiendrait à de petits courants circulant dans le même sens autour de chaque molécule, de sorte qu'un aimant est un véritable solénoïde. Lorsque l'aimant est orienté, les petits courants vont à la partie inférieure de l'est vers l'ouest. Nous reviendrons du reste sur cette théorie, qui rattache si complètement les phénomènes magnétiques aux phénomènes électriques.

Il résulte de cette manière d'envisager les aimants qu'un solénoïde et un aimant doivent exercer l'un sur l'autre la même action qu'un aimant sur un autre aimant, ou un solénoïde sur un autre solénoïde. C'est en effet ce qu'on peut vérifier par l'expérience. Le pôle nord d'un aimant attire le pôle sud d'un solénoïde et repousse l'autre pôle, et réciproquement. On en conclut encore qu'un courant fixe doit agir sur un aimant mobile et le faire mouvoir de façon qu'il se place perpendiculairement au conducteur et dans un sens déterminé.

ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

Déviation de l'aiguille aimantée par les courants. — L'électromagnétisme comprend l'étude complète des rapports qui existent entre les courants et les aimants. Le phénomène fondamental est la déviation de l'aiguille aimantée sous l'influence du courant

électrique. Il a été découvert par Ærsted, en 1819, avant les travaux d'Ampère sur l'électro-dynamique ; mais d'après la manière d'envisager les aimants que nous venons d'indiquer, on peut le considérer comme une conséquence de l'action des courants les uns sur les autres.

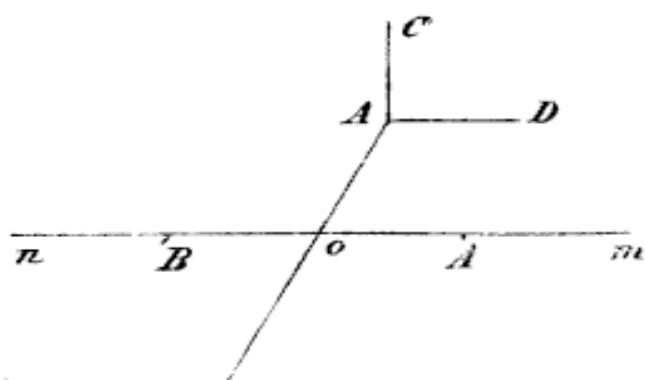
Lorsqu'une aiguille aimantée mobile est placée au-dessous d'un courant rectiligne et à une faible distance, elle est déviée et tend à se placer perpendiculairement à la direction du courant. Si le sens du courant ou la position de l'aiguille change, la déviation a lieu en sens contraire. Une règle très-simple permet de définir simplement le sens de cette déviation. Il faut se supposer couché dans le conducteur, de telle façon que le courant passe des pieds à la tête, c'est-à-dire qu'on ait les pieds du côté du pôle positif, et la tête du côté du pôle négatif. Si alors on regarde le pôle nord de l'aiguille, on le voit se mouvoir vers la droite.

Cette propriété peut donc servir à reconnaître si un fil est parcouru par un courant, et quel est le sens de ce courant. On abat donne l'aiguille aimantée à elle-même, pour qu'elle prenne la direction que lui imprime l'action de la terre. On présente alors au-dessus le conducteur à essayer : si l'aiguille est déviée, on est assuré que le courant existe, et il suffit pour connaître son sens de voir comment il faut se supposer placé dans le conducteur pour avoir le pôle nord tourné vers la droite en regardant l'aiguille.

Si la terre n'avait pas d'action sur l'aiguille, elle se placerait normalement au courant ; on peut s'en assurer en suspendant au même fil deux aiguilles aimantées à des hauteurs différentes, disposées en sens contraire ; la terre n'agit pas sur ce système, qu'on nomme astatique. Si alors on place le courant au-dessus de l'aiguille supérieure, elle tourne et se place dans une position exactement perpendiculaire au courant, en entraînant

l'autre aiguille, sur laquelle le courant agit avec moins d'énergie à cause de la distance.

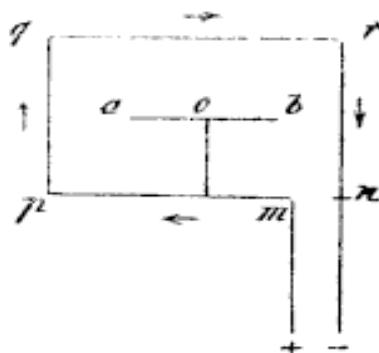
Si donc AB est la direction normale de l'aiguille, et si au-



dessus on place un courant mn , l'aiguille est poussée par le courant perpendiculairement à mn ; il est au contraire attiré par le magnétisme terrestre dans cette direction. L'aiguille prend donc une direction telle que les forces $A'D$ et $A'C$ qui agissent sur elle se fassent équilibre. La force AD provenant de l'action de la terre est proportionnelle à la quantité plus ou moins grande de magnétisme que possède l'aiguille. Quant à la force $A'C$, elle est aussi proportionnelle au magnétisme de l'aiguille; mais elle dépend en outre de l'éloignement du conducteur et de la quantité d'électricité qui le traverse, c'est - à - dire de l'intensité du courant. Il est évident qu'elle doit être proportionnelle à cette intensité, car si l'on plaçait sur BA un second conducteur pareil au premier et parcouru par un même courant, l'action serait double, en même temps que la quantité d'électricité traversant les deux conducteurs réunis. On nomme déviation l'angle $A'oA$ que fait l'aiguille avec sa position normale. On voit que cette déviation est d'autant plus grande que la force $A'C$ est plus grande, ou que l'intensité est plus considérable.

Galvanomètres. — Si une aiguille $a\ b$ est placée sur un pivot

au centre d'un cadre autour duquel on place un fil con-



ducteur $m p q r n$ traversé par le courant, et si l'on examine l'action de chacun des côtés du cadre d'après la règle indiquée plus haut, on voit que tous agissent de la même manière : par exemple si a est le pôle nord, et si le courant marche dans la direction $m p q r n$; les quatre côtés $m p$, $p q$, $q r$ et $r n$ tendent à faire tourner l'aiguille de façon à faire aller le côté $o a$ en avant de la figure.

L'action sur l'aiguille est donc plus grande que dans le cas où l'on avait un seul fil placé au-dessus ou au-dessous de l'aiguille. Si le cadre est entouré de plusieurs conducteurs semblables à $m p q r n$, parcourus par des courants égaux, ils agissent tous de la même manière, et l'action est proportionnelle au nombre de tours. On peut facilement démontrer par l'expérience que l'intensité d'un courant est la même aux divers points d'un conducteur. En présentant au-dessus d'une aiguille aimantée et à la même distance diverses parties d'un fil traversé par un courant, on trouve, en effet, que la déviation est la même. On peut donc enrouler autour du cadre plusieurs fois le même conducteur, et l'action du courant sur l'aiguille est proportionnelle au nombre de ces tours.

L'instrument ainsi disposé se nomme multiplicateur ou galva-

momètre, et se compose d'un cadre autour duquel un fil est enroulé un certain nombre de fois, et dont les deux extrémités sont libres. Si l'on veut reconnaître l'existence d'un courant dans un conducteur, il faut rompre le circuit et y intercaler le fil du galvanomètre. La déviation indique le passage du courant et sa direction ; elle peut même servir à comparer deux courants, en indiquant le plus intense par une plus grande déviation de l'aiguille.

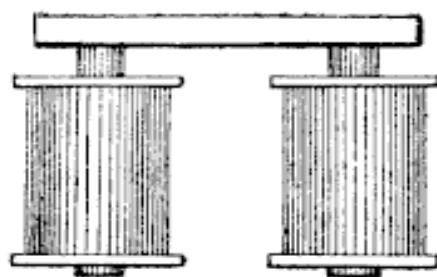
Aimantation de l'acier par les aimants. — Lorsqu'une aiguille aimantée est posée au centre d'un cadre parcouru par le courant, elle tend, comme nous l'avons vu, à se placer normalement au plan du cadre et dans une direction déterminée. Si donc on fixe l'aiguille dans une position contraire à celle qu'elle tend à prendre, il est évident que le courant doit produire une désaimantation, et c'est, en effet, ce que l'expérience constate. Si, au contraire, on place perpendiculairement au cadre une aiguille d'acier non aimantée, l'électricité agit sur le magnétisme et aimante l'aiguille, de façon qu'elle se trouve placée par rapport au cadre dans la position que le courant lui ferait prendre si elle était préalablement aimantée.

Une seule circonférence de fil autour de l'aiguille ne produit que peu d'effet ; on l'augmente beaucoup en ayant plusieurs cadres, ou, en d'autres termes, en plaçant l'aiguille dans un tube autour duquel le fil est enroulé. On a ainsi un véritable solénoïde qui, comme nous l'avons vu, a deux pôles ; l'aiguille placée au centre s'aimante, et le sens de l'aimantation est le même que celui du solénoïde.

La force de l'aimantation dépend de la force du courant, mais elle n'augmente pas avec sa durée. Elle a lieu aussi lorsque l'hélice qui constitue le solénoïde est traversé par l'électricité statique provenant de la décharge d'une bouteille de Leyde.

Aimantation du fer doux. — Le fer doux s'aimante comme l'acier sous l'influence du courant; mais l'aimantation, au lieu d'être permanente, cesse avec le courant. Ainsi, imaginons un cylindre de fer doux autour duquel est enroulé en spirale un fil conducteur isolé avec de la soie; si l'on fait passer un courant dans le fil, le fer doux s'aimante et reste aimanté tant que doré le courant dans le fil. Quant au sens de l'aimantation, il dépend de la direction du courant dans le fil, et il est toujours facile de s'en rendre compte, en observant que la position des pôles de l'aimant est celle que le courant tendrait à donner à un aimant fixe placé à l'intérieur de la bobine. On a donc le pôle nord à droite, si l'on regarde l'axe du barreau de fer doux, en se supposant placé dans le fil de façon à être traversé des pieds à tête par le courant. Si le fil n'était pas enroulé dans le même sens, dans toute l'étendue du cylindre, on aurait, à chaque changement de direction du courant, un changement de sens dans l'aimantation, ou des points conséquents.

Un barreau de fer doux ainsi entouré d'un fil conducteur ^{est} nomme électro-aimant. On lui donne plus ordinairement la forme d'un fer à cheval; ceux qu'on emploie dans la plupart des



Applications de l'électricité se composent de deux cylindres ^{par} rapprochés réunis par un troisième. On enroule le fil autour ^{des} deux barreaux parallèles; il forme deux bobines distinctes, ^{qui} sont réunies par un fil conducteur. Ces deux bobines sont sou

vent formées d'un cylindre en cuivre autour duquel le fil est enroulé ; l'extrémité du fil conducteur est soudée au cylindre de cuivre, et le passage du courant, d'une bobine à l'autre, se fait par le fer doux lui-même.

On développe dans le fer doux, avec des courants énergiques, une force très-considerable ; ainsi, avec un courant intense, un électro-aimant peut supporter jusqu'à 1,000 kilogrammes.

On a fait de nombreuses expériences pour reconnaître l'influence de l'intensité du courant, du nombre de tours, de la forme et de la dimension des électro-aimants sur la force magnétique développée. Elles consistent à prendre une armature en fer munie d'un crochet auquel on suspend des poids ; on en ajoute jusqu'à ce que l'armature retombe, ce qui fait connaître le poids que peut supporter l'électro-aimant.

On a ainsi trouvé que le poids supporté est proportionnel au carré de l'intensité du courant. Si l'on fait attention maintenant qu'un aimant agit par influence sur le fer doux de l'armature, en décomposant son fluide neutre et en déterminant une aimantation de sens contraire, proportionnelle à celle qu'il possède lui-même, que l'attraction de deux aimants est proportionnelle au produit des quantités de magnétisme qu'ils possèdent, et que par conséquent l'attraction entre un aimant et un barreau de fer doux est proportionnelle au carré du magnétisme que possède l'aimant, on en conclura facilement que le magnétisme développé dans un électro-aimant est directement proportionnel à l'intensité du courant.

Quant à l'influence du nombre de tours, on a trouvé que le magnétisme développé lui est proportionnel, l'intensité étant d'ailleurs constante. Il faut toutefois que les tours ne passent pas une certaine limite d'éloignement. Cette limite est de 12 à 15 millimètres environ. Tous les tours compris dans cette limite ont

donc sensiblement la même action, bien qu'ils soient à des distances différentes. Cela tient à ce que les tours plus éloignés, ayant une action directe moins énergique, ont plus d'étendue. A partir de cette limite d'éloignement, l'influence du courant sur le fer doux diminue très-rapidement. On doit donc éviter de la dépasser, car on augmenterait sans avantage la longueur du circuit. Le fil doit donc être distribué dans toute cette étendue. On peut faire varier l'épaisseur du fil, de façon à changer le nombre de tours, mais si d'un côté, en augmentant le nombre, on augmente l'action du courant sur le fer doux, d'un autre côté on diminue l'intensité du courant. Il existe une disposition pour laquelle le magnétisme développé est le plus grand possible : on ne peut la déterminer que lorsqu'on connaît l'influence que peut exercer sur l'intensité du courant le nombre des tours. Nous y reviendrons plus tard.

La forme des électro-aimants a une certaine influence sur le magnétisme développé ; ainsi un cylindre creux en fer doux d'une très-faible épaisseur, entouré d'un fil conducteur, de la même manière qu'un cylindre plein d'égale dimension, peut soutenir un poids moins considérable qu'un cylindre plein ; mais si l'épaisseur atteint une certaine limite, un tiers du rayon environ, la force magnétique développée est la même dans les deux cylindres.

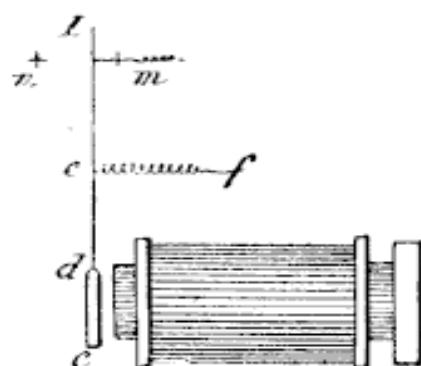
On a fait sur les électro-aimants une foule d'expériences pour déterminer les lois qui les régissent, mais on a souvent trouvé des résultats qui paraissent contradictoires, parce que beaucoup de causes font varier le magnétisme développé. L'une des plus importantes est la nature du fer, son état de pureté et même la manière dont il est préparé. Ainsi il peut arriver que deux électro-aimants qui paraissent entièrement identiques ne supportent pas le même poids.

Lorsqu'un électro-aimant soutient une armature, si le courant

est interrompu, l'armature reste ordinairement attirée, et même avec une force considérable. Quand on opère la séparation, le magnétisme disparaît, ou du moins ce qui subsiste tient à ce que le fer n'est jamais entièrement dépourvu de force coercitive. Le magnétisme qui reste dans l'électro-aimant, avant la séparation de l'armature, se nomme magnétisme rémanent. Il est d'autant plus considérable que l'aimantation a été plus forte. Dans les applications de l'électricité, il est ordinairement nécessaire que l'armature se détache dès que le courant cesse de passer, et le magnétisme rémanent est alors un obstacle sérieux. On peut le détruire dans quelques cas particuliers en envoyant, au moment où le courant cesse de passer, un courant très-faible en sens contraire.

Pour ramener l'armature à sa position, lorsque le courant est interrompu, on emploie ordinairement un ressort qu'on nomme ressort antagoniste ou ressort de rappel.

On dispose en télégraphie les électro-aimants, comme l'indique la figure ci-contre. Le barreau de fer doux est entouré de fil



recouvert de soie, *e d* est l'armature disposée en forme de plaque ou de palette mobile autour de deux vis *d*, qui la soutiennent; *d I* est une tige qui tient à la palette; elle se meut entre

deux vis *m* et *n* qui limitent sa course. Enfin *e f* est le ressort de rappel, qui est ordinairement un petit ressort-boudin qu'on tend à volonté, cette tension doit varier avec l'intensité du courant, puisque le ressort a surtout pour but de vaincre le magnétisme rémanent qui varie avec l'aimantation développée dans le fer doux.

En envoyant une série de courants discontinus, on peut faire mouvoir la palette avec une grande rapidité. Le nombre de vibrations de l'armature qu'on peut obtenir est très-considerable, le fer doux pouvant s'aimanter et se désaimanter plusieurs milliers de fois par seconde. On peut s'en assurer en prenant un électro-aimant dont l'armature est traversée par le courant qui aimante l'électro-aimant. Le circuit est fermé quand l'armature tirée par le ressort de rappel vient toucher la vis qui limite sa course. Dès que l'armature est attirée le circuit se rompt; il se produit ainsi une série d'oscillations dont on peut connaître exactement le nombre par le son qui se produit.

GALVANOMÈTRES ET BOUSSOLE.

Moyens divers de reconnaître le passage du courant. — Chacune des propriétés du courant peut servir à reconnaître son passage. Ainsi l'étincelle produite quand on réunit deux bouts de fil, l'échauffement d'un fil fin, sont un indice de la transmission de l'électricité; mais ces propriétés se constatent difficilement, et exigent un courant assez intense pour se manifester; elles ne peuvent, d'ailleurs, donner qu'une idée très-imparfaite de l'intensité du courant.

La décomposition des corps composés peut être employée avec avantage. L'instrument dont on se sert dans ce cas se nomme

voltamètre. On fait plonger les deux extrémités du conducteur, au-dessous de deux petites cloches, dans un vase contenant de l'eau; s'il se dégage des bulles de gaz, on peut être assuré que le courant passe, et le volume du gaz produit dans l'unité de temps est exactement proportionnel à la quantité d'électricité qui traverse le liquide ou à l'intensité du courant. Le voltamètre peut donc servir à mesurer avec une grande précision l'intensité d'un courant, en adoptant pour unité le courant qui, pendant l'unité de temps, produit le volume de gaz qu'on prend pour unité. Au lieu d'employer l'eau comme corps composé, on préfère quelquefois les sels métalliques, le sulfate de cuivre par exemple. Le cuivre se dépose sur l'électrode positif, et le poids dont s'accroît cet électrode est proportionnel à l'intensité du courant.

L'action des courants sur les courants est peu utilisée, parce qu'elle nécessite un appareil particulier assez compliqué qui permette d'avoir un courant mobile; mais si un pareil courant était obtenu, il suffirait de lui présenter un conducteur pour reconnaître s'il est parcouru ou non par l'électricité, ce qu'on reconnaîtrait au mouvement du premier courant.

L'aimantation de l'acier par l'électricité est utile lorsqu'on veut comparer des courants d'une faible durée ou instantanés, comme ceux qui sont produits par la décharge d'une batterie électrique ou d'une bouteille de Leyde. Une aiguille d'acier placée au centre d'une hélice que parcourt le fluide, s'aimante; si donc on compare deux aiguilles aimantées par des courants différents, en mesurant leur action sur une troisième aiguille aimantée d'une façon permanente, on a le rapport des intensités des deux courants.

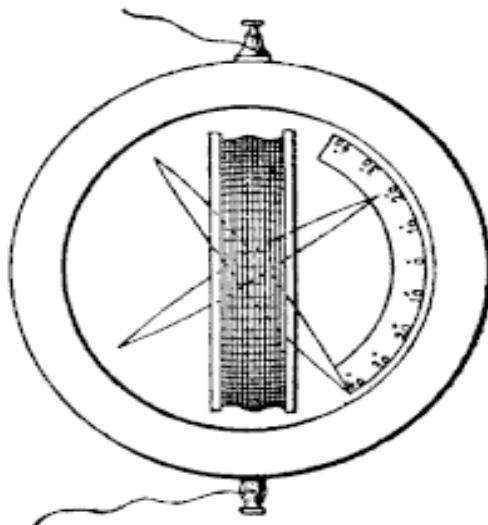
Le fer doux s'aimante aussi, et le poids supporté est propor-

tionnel au carré de l'intensité du courant. On peut donc encore profiter de cette propriété pour reconnaître le passage du courant et apprécier son intensité. Il suffit d'avoir une armature munie d'un crochet : l'armature est soutenue par l'électro-aimant, et on ajoute des poids jusqu'à ce qu'elle se détache. On peut aussi employer un ressort fixé à l'armature. On tend le ressort jusqu'à ce que l'armature cède à son action. Une aiguille fixée au ressort fait connaître la tension, et par suite la force attractive développée par le courant.

Galvanomètres. — Enfin, l'appareil le plus simple pour étudier les courants est le galvanomètre. Nous avons déjà vu qu'il est fondé sur l'action qu'exerce le courant sur l'aiguille aimantée, et se compose d'une aiguille mobile au centre d'un cadre autour duquel est enroulé un fil conducteur que traverse le courant. Le sens de la déviation indique la direction du courant.

Quant à l'intensité, elle n'est pas proportionnelle à la déviation, puisque le plus grand angle que peut faire l'aiguille avec la direction normale, est de 90° ; mais elle augmente avec elle; ainsi, quand on fait traverser successivement par deux courants le fil d'un galvanomètre, celui qui donne la plus grande déviation est le plus intense.

Pour se servir d'un galvanomètre, il faut commencer par l'orienter. L'aiguille se plaçant d'elle-même dans la direction du méridien magnétique, on tourne le cadre de façon qu'il se trouve juste au-dessus de l'aiguille, car c'est dans cette position qu'il a sa plus grande action. Deux bornes placées au bord de l'appareil reçoivent les deux extrémités du fil que parcourt le courant. L'aiguille intérieure étant cachée par le cadre, on fixe ordinairement au même axe, soit perpendiculairement, soit dans la



même direction, et alors au-dessus du cadre, une aiguille de cuivre qui se meut au-dessus d'un arc gradué ; c'est cette seconde aiguille qui indique les déviations.

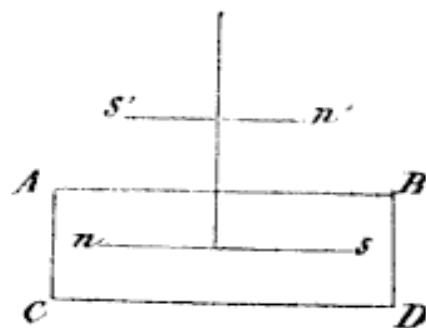
L'aiguille est généralement placée sur un pivot; cependant, pour les expériences délicates, on la suspend à un fil de cocon, pour éviter les frottements qu'elle éprouve toujours en tournant sur le pivot.

Influence du nombre de tours. — La plus grande déviation qu'on puisse avoir avec un galvanomètre est 90° , puisque le courant, quelque intense qu'il soit, ne peut que pousser l'aiguille perpendiculairement au cadre. Si donc on fait varier l'intensité du courant, la déviation augmente et se rapproche de 90° , qui est sa limite. Il s'ensuit donc que l'on peut comparer difficilement deux courants qui sont assez intenses pour amener l'aiguille près de 90° . D'un autre côté, si le courant est peu intense, il peut se faire que la déviation soit trop peu sensible pour être observée. C'est en faisant varier le nombre des tours qu'on peut apprécier le galvanomètre aux divers besoins ; et

Il faut faire en sorte que la déviation se tienne dans les limites de 5 à 50 degrés.

L'action du courant sur l'aiguille est proportionnelle au ~~nombre~~ nombre de tours; par conséquent, si l'on veut observer des courants très-intenses, il faudra en diminuer le nombre, le réduire à un ou deux, par exemple; pour des courants peu intenses, il faudra, au contraire, l'augmenter; ainsi, on a des galvanomètres qui ont 5 et 600 tours, et qui permettent d'observer des courants qui, avec 12 ou 15 tours de fil autour de l'aiguille, ne donneraient aucune déviation. Il y a pourtant dans ce dernier cas une limite; car, à mesure qu'on augmente le nombre des tours, on augmente la résistance générale du circuit, et, par suite, on diminue l'intensité du courant. Il y a une disposition du fil qui donne le maximum d'effet; on la détermine de la même manière que pour les électro-aimants.

Galvanomètres astatiques. -- On peut encore augmenter la sensibilité des galvanomètres en annulant l'action de la terre, et l'on y parvient facilement en suspendant au même fil deux aiguilles également aimantées, mais placées en sens contraire. L'une des aiguilles $n\ s$ se trouve à l'intérieur du cadre, et l'autre $n'\ s'$ au-dessus. La terre n'agit pas sur ce système, et l'action



du courant se compose de celle du cadre sur l'aiguille $n\ s$, à la

quelle s'ajoute évidemment celle de la partie A B, sur l'aiguille $n' s'$. Quant au côté C D, son action sur $n' s'$ est contraire à la précédente, mais elle est très-faible à cause de la distance.

Galvanomètre différentiel. — Quand on veut comparer deux courants, pour reconnaître le plus intense, on peut se servir d'un galvanomètre ordinaire, puisque la plus grande intensité est indiquée par une plus grande déviation. Pourtant, quand les deux courants ont à peu près la même intensité, ce procédé est peu commode, et l'on emploie de préférence le galvanomètre différentiel. Il se compose d'un cadre autour duquel sont enroulés deux fils exactement pareils. On place l'un d'eux dans le circuit du premier courant, et l'autre dans celui du second, mais de façon à ce que les courants tournent en sens contraire sur le cadre. Si les deux courants ont la même intensité, l'aiguille reste en repos; mais, s'ils sont inégaux, l'aiguille dévie, et le sens de la déviation fait connaître le plus intense des deux courants.

Graduation des galvanomètres. — Les galvanomètres ordinaires ne peuvent qu'indiquer le plus fort de deux courants, mais ils ne donnent pas le rapport qui existe entre leurs intensités; ainsi un premier courant donnant une déviation de 40 degrés et un autre de 80, on ne connaît pas le rapport qui existe entre ces deux courants.

Pour se servir d'un galvanomètre, quand on veut mesurer exactement le rapport des intensités de divers courants, il faut commencer par le graduer. Voici un moyen assez simple d'obtenir cette graduation. On enlève le fil qui entoure le cadre, et on le fait communiquer avec les deux pôles d'une pile, de façon qu'il soit entièrement parcouru par le courant. Le cadre étant orienté préalablement, on enroule sur lui une partie de ce fil, mais de façon qu'il fasse un seul tour, et on marque 1 au point où s'arrête l'aiguille. On enroule ensuite un second tour, l'aiguille

avance, et l'on marque 2 au point où elle s'arrête. On enroule un troisième tour, un quatrième tour, etc., et on marque 3, 4, etc., à chaque déviation obtenue. Le courant étant le même dans ces diverses opérations, puisqu'on n'a changé ni la pile ni le conducteur, dont on a seulement modifié la disposition, la force qui fait dévier l'aiguille est bien 1, 2, 3, 4, etc., suivant le nombre de tours. Si donc, une fois ces nombres marqués sur le cadran, on fait passer dans le galvanomètre divers courants, et s'ils font dévier l'aiguille et la font aller en face des nombres marqués 3 et 5 par exemple, on sera certain que, l'intensité du premier courant étant représenté par 3, celle du second doit l'être par 5. Leur rapport est 3 : 5. Si l'aiguille s'arrête entre deux divisions, par exemple au milieu des nombres 3 et 4, et au tiers entre 5 et 6, on peut prendre pour les nombres qui représentent les courants $3 + \frac{1}{2}$ et $5 + \frac{1}{3}$, et leur rapport des intensités est $3 + \frac{1}{2} : 5 + \frac{1}{3}$. Ce dernier rapport n'est pas parfaitement exact, mais l'on peut s'en contenter si les chiffres 1, 2, 3, marqués sur le cadran sont assez rapprochés; ce qui peut toujours avoir lieu si le premier courant pris pour unité est assez faible.

On peut encore graduer un galvanomètre au moyen d'un voltamètre. On met le voltamètre en même temps que le galvanomètre à graduer dans le circuit, et l'on fait varier le courant en changeant le nombre des éléments de la pile ou en mettant dans le circuit des conducteurs dont on fait varier la longueur. Un premier courant pris pour unité produisant un certain volume de gaz dans l'unité de temps, si d'autres courants en produisent des volumes doubles, triples, etc., on mettra le numéro 1 au point où l'aiguille du galvanomètre s'arrête la première fois, 2, 3, etc., aux points où les courants suivants la font s'arrêter.

Ainsi donc un galvanomètre gradué porte deux séries de numéros

numéros, les numéros des degrés qui sont également espacés, et vont de 0 à 90, et les numéros des intensités de courant, qui peuvent augmenter indéfiniment. On peut prendre pour unité de courant celui qui fait dévier de 1 degré l'aiguille du galvanomètre, et alors le numéro 1 appartient en même temps aux deux séries de numéros. On trouve que jusqu'à 10 degrés les numéros qui représentent l'intensité correspondent à très-peu près aux numéros des degrés. On peut donc dire que jusqu'à 10 degrés les intensités sont proportionnelles aux degrés. Le courant qui donne 8 degrés, par exemple, est double de celui qui en produit 4, quadruple de celui qui en produit 2, et ainsi de suite. A partir de 10 degrés, et à mesure qu'on avance, les chiffres qui correspondent aux intensités du courant vont beaucoup plus rapidement que les degrés.

Ainsi, par exemple, 20 degrés correspondront à une intensité de 25, ou 25 fois plus grande que celle du courant qui produit 1 degré.

40 correspondront à une intensité représentée par 70.
 50 — — — 100.

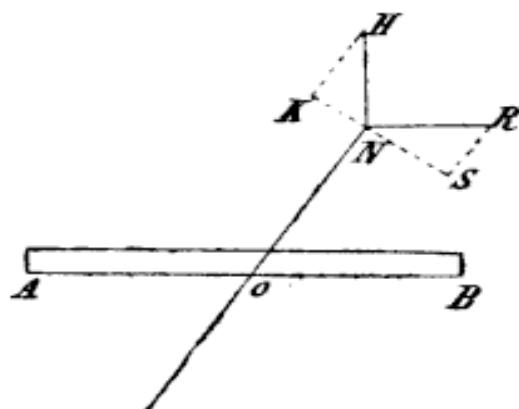
Enfin 90 à une intensité infiniment grande.

Au lieu d'avoir les numéros des intensités marqués sur le limbe gradué, on peut conserver les degrés ordinaires marqués et avoir un tableau qui, pour chaque degré, donne l'intensité qui lui correspond.

Si tous les galvanomètres étaient exactement semblables, le même tableau pourrait servir dans tous les cas, mais il n'en est pas ainsi : les cadres n'ont ni les mêmes dimensions ni les mêmes formes, leurs côtés sont à des éloignements différents de l'aiguille, et dès lors il faut pour chaque galvanomètre une graduation spéciale. On peut l'obtenir comme nous l'avons dit plus haut, ou encore plus facilement avec un galvanomètre préalablement

gradué. On met les deux galvanomètres dans le même circuit, on fait varier l'intensité du courant, et l'on marque sur le limbe de celui qui doit être gradué les numéros auxquels s'arrête l'aiguille de l'autre.

Graduation par le calcul. — On pourrait encore avoir une graduation du galvanomètre par le calcul. On peut en effet déterminer l'action du cadre sur l'aiguille quand elle se trouve dans une position donnée, et lorsque le courant a une intensité fixe qu'on prend pour unité. Supposons que V soit cette action. Si le courant est i , l'action est Vi .



Ainsi A B étant le cadre orienté, et o N l'aiguille, au moment où elle s'arrête, elle est poussée dans la direction N H perpendiculaire au cadre par une force égale à Vi , et elle est attirée par l'action de la terre dans la direction H R par une force constante que nous nommerons T.

D'après les principes de statique connus, pour que ces forces se fassent équilibre, il faut que les composantes N S et N K des deux forces NR ou NH soient égales.

$$N S = N R \cos R N S = T \sin z$$

$$N K = N R \sin R N K = V i \cos z$$

en nommant z l'angle de la déviation N o B.

Il faut donc qu'on ait :

$$T \sin \delta = V i \cos \delta.$$

par conséquent: $i = \frac{T}{V} \operatorname{tg} \delta.$

Ainsi donc l'aiguille s'arrêtant dans une position déterminée, si l'on a déterminé l'action du cadre sur elle, ou V , on a la valeur de l'intensité qui produit cette déviation δ . Les calculs pour la détermination de cette valeur V sont très-compliqués, car il faut chercher l'action de chacune des parties du courant sur le pôle de l'aiguille.

L'équation précédente montre en outre que la déviation de l'aiguille d'un galvanomètre, pour une intensité de courant, est la même, quel que soit le magnétisme qu'elle possède ; en effet, on a

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{T}{KI}, \quad T \text{ étant la force directrice de la terre (N R) et } V i \text{ la}$$

force répulsive du courant (N H) ; or ces deux forces sont proportionnelles au magnétisme que possède l'aiguille ; si donc son magnétisme diminue de moitié, l'action de la terre T est réduite de moitié, ainsi que la force KI , la valeur du quotient ne change donc pas, et l'angle δ reste le même. Il était important de faire cette observation, qui montre que les indications données par un galvanomètre à des époques différentes restent comparables, bien que l'aiguille ait pu perdre une partie de son magnétisme.

La graduation des galvanomètres est donc une opération assez délicate. On est parvenu à la rendre inutile par une disposition particulière du cadre.

Boussole de tangente. — Nous venons de voir que pour un

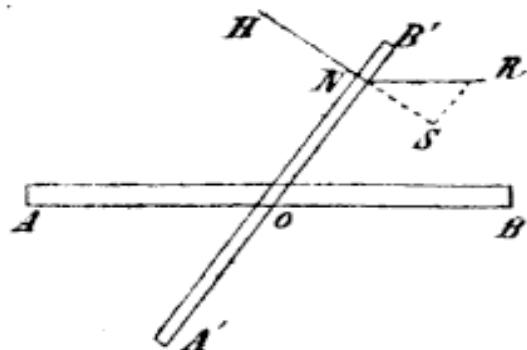
galvanomètre, quand un courant passe autour du cadre et produit une déviation de l'aiguille δ , on a la relation :

$$I = \frac{T}{V} \tan \delta.$$

I étant l'intensité du courant, T l'action de la terre et V l'action du cadre, quand le courant a une intensité fixe qu'on prend pour unité.

La valeur de V est différente pour chaque position de l'aiguille, parce que le pôle sur lequel agit le courant se trouve à des distances différentes du conducteur; mais si le cadre a de très grandes dimensions, et si l'aiguille est au contraire très-petite, la distance du pôle aux divers points du cadre est la même dans toutes les positions de l'aiguille, et par conséquent V reste constant. Comme T ne varie pas, on peut regarder $\frac{T}{V}$ comme constant, et on conclut de la formule précédente que l'intensité du courant est proportionnelle à la tangente de l'angle de déviation. La boussole de tangente se compose donc d'un grand cadre circulaire au centre duquel est suspendue une petite aiguille aimantée.

Boussole de sinus. — La boussole de sinus permet aussi de comparer les courants sans graduation préalable. Le cadre est mobile; lorsque l'aiguille est orientée ainsi que le cadre, si on fait passer le courant, l'aiguille dévie. On tourne alors le cadre en l'avancant sur l'aiguille, dont la déviation augmente naturellement; on tourne encore le cadre, et en continuant à le déplacer ainsi dans le même sens, il arrive un moment où l'aiguille s'arrête dans son plan. On a alors la déviation, qui est la même pour le cadre et pour l'aiguille. Avec cette boussole, l'intensité du courant est proportionnelle au sinus de l'angle de déviation.



En effet, soit AB la première position du cadre, $A'B'$ celle qu'il occupe quand on l'a fait mouvoir en suivant l'aiguille jusqu'à ce qu'elle soit dans le même plan; l'aiguille est sollicitée par deux forces : la première NR ou T provenant de l'action de la terre, et par conséquent parallèle à AB ; la seconde NH , provenant du courant, et perpendiculaire au cadre $A'B'$. Cette seconde force est proportionnelle à l'intensité du courant, et peut être représentée par VI . Pour qu'il y ait équilibre, il faut que la composante NS de la force NR soit égale à la force NH , si l'on nomme δ la déviation NB ,

$$NS = NR \sin \delta = T \sin \delta.$$

On a donc l'équation

$$VI = T \sin \delta$$

$$\text{ou } I = \frac{T}{V} \sin \delta.$$

Or V est l'action du cadre quand l'intensité est égale à 1; elle est la même pour toutes les déviations puisque le cadre est toujours dans la même position par rapport à l'aiguille; on peut donc regarder $\frac{T}{V}$ comme constant. On en conclut que l'intensité I

juillet 1859.

*

est proportionnelle au sinus de l'angle de déviation. Ainsi, l'angle de 90° a pour sinus 1, et l'angle de 60° $\frac{1}{2}$. Le courant qui produit une déviation de 90° est donc double de celui qui donne pour déviation 60° .

La déviation de l'aiguille pour les galvanomètres ordinaires est toujours inférieure à 90° ; elle peut s'en approcher indéfiniment quand l'intensité augmente, mais elle n'atteint jamais cette limite. Il n'en est pas de même pour les boussoles de sinus; on a, en effet, $\sin. \alpha = \frac{VI}{T}$. Si cette valeur est plus grande que l'unité, il n'existe pas de position du cadre pour laquelle l'équilibre de l'aiguille puisse avoir lieu. En faisant mouvoir dans ce cas le cadre jusqu'à 90° , l'aiguille continue à tourner. On dit que la boussole renverse; pour s'en servir, il faut diminuer le nombre des tours.

Galvanomètres employés en télégraphie. — On se sert dans les bureaux télégraphiques français de boussoles de sinus pour mesurer les courants et faire les expériences relatives aux dérangements. Les boussoles qu'on emploie ont 12 tours de fil, et le courant nécessaire pour faire marcher les appareils donne environ 6 degrés à cette boussole. On peut jusqu'à 20° regarder les sinus comme proportionnels aux arcs, et dans cette limite prendre les degrés ordinaires pour représenter les intensités.

Dans les postes, on emploie en outre d'autres galvanomètres très-simples qui ont pour but unique de faire connaître quand le courant passe. On rend l'orientation inutile en plaçant au-dessous de l'aiguille un aimant fixe qui la ramène toujours dans la même direction. Ce genre de galvanomètre ne pourrait servir à comparer l'intensité de deux courants, surtout à des époques différentes, car le magnétisme de l'aimant fixe peut changer, ce qui fait varier les résultats.

Enfin, on se sert quelquefois d'une boussole verticale. L'aiguille est ramenée dans la position verticale par un petit poids ; elle est au centre du cadre, et mobile autour d'un axe horizontal. Une seconde aiguille fixée au même axe se meut devant un cadran. Cette boussole, qui, comme la précédente, n'a pas besoin d'être orientée, est d'un emploi commode lorsqu'on doit l'emporter pour faire des expériences sur les lignes.

HYPOTHÈSE D'AMPÈRE SUR L'ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

Nous avons déjà parlé de cette hypothèse à propos de l'analogie qui existe entre les aimants et les solénoïdes. Il nous reste à ajouter quelques mots sur cette théorie, l'une des plus remarquables de la physique.

Lorsqu'un courant circule autour d'un électro-aimant, il aimante le fer doux, mais il ne développe pas des courants circulaires autour de chaque molécule ; il faut admettre que ces courants préexistent dans le fer, qu'ils ont des directions quelconques, et qu'un courant circulant autour les fait tourner de façon à leur donner la même direction, en vertu de la propriété de deux courants de se placer parallèlement.

Ainsi, autour de chaque molécule de fer doux il circule un courant dont le sens est variable d'une molécule à l'autre. Cette diversité dans le sens des courants fait que le fer doux ne jouit pas des propriétés magnétiques, l'effet de ces courants s'annulant ou à peu près.

Si, par une cause quelconque, on rend tous ces courants parallèles on a un aimant, et l'un des moyens qu'on peut employer consiste, comme nous l'avons vu, à placer le fer doux au centre

d'une bobine autour de laquelle on fait circuler un courant ^{vol}taïque.

Les difficultés qu'éprouvent ces petits courants à se mouvoir et à devenir parallèles, ou la force qui s'oppose à leur mouvement, se nomme force coercitive ; elle est nulle dans le fer doux et assez forte dans l'acier trempé. Ainsi, pour un électro-aimant dès qu'on cesse de faire passer un courant dans la bobine qui l'enroule, tous les petits courants moléculaires reviennent à leur position naturelle ; ils cessent d'être parallèles, et l'aimantation disparaît. Au contraire, pour l'acier, la force coercitive s'oppose au mouvement des petits courants, et l'aimantation subsiste.

La terre doit, dans cette théorie, être considérée comme ^{par} courue par des courants qui circulent à sa surface, et marchent dans notre hémisphère de l'est à l'ouest. Ils agissent sur l'^{av}guille aimantée et la placent perpendiculairement à leur ^{dir}ection, c'est-à-dire du nord au sud.

Quant à la cause première de ces courants, elle est incoune^{peut-être} et tiennent-ils au mouvement de la terre dans l'espace^{mais} pour les expliquer, il faudrait, sans doute, changer l'hyp^{thèse} première des deux fluides électriques.

APPLICATIONS DE L'ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

La plupart des propriétés électriques donnent lieu à des ^{app}lications utiles ; ainsi les propriétés lumineuses et calorifiques ^{de} courants électriques ont donné naissance à l'éclairage électrique. L'électro-chimie a conduit aux procédés de dorure et d'argenture ^{par} la pile, ou en d'autres termes à la galvanoplastie. Les applic^{tions} de l'électro-magnétisme ne sont pas moins importantes. Nous citerons la télégraphie et les machines électro-magnétiques.

L'électro-chimie aurait pu servir de base à la télégraphie, puisque la décomposition de l'eau ou d'un sel par le courant électrique permet de reconnaître le passage d'un courant envoyé d'une station plus ou moins éloignée ; mais la propriété du courant d'aimanter le fer doux a permis d'obtenir des appareils beaucoup plus faciles à employer. On peut varier à l'infini le moyen d'utiliser le mouvement d'une armature mobile : aussi existe-t-il une foule de systèmes télégraphiques différents.

Chaque système comprend deux appareils distincts : l'un d'eux, nommé manipulateur, sert à envoyer le courant au poste correspondant, et l'autre, nommé récepteur, sert à reconnaître le passage du courant quand on reçoit. Pour faire des signaux différents, on peut envoyer des courants successifs d'égale durée, en faisant varier leur espacement. Ainsi, en représentant ces courants par des points, on peut avoir les lettres formées chacune par une série de deux points de la manière suivante :

... ... *a*
... .. *b*
... ... *c*
etc.

Chaque lettre serait séparée d'une autre, dans une dépêche, par un espace plus considérable que celui qui sépare deux points ou deux séries dans la même lettre.

On fait ordinairement varier la durée des courants, et en se bornant à deux émissions de courants différents, l'une très-courte représentant un point, et l'autre plus longue représentant un trait, on a l'alphabet Morse :

. -- *a*
— ... *b*
— ... *c*
etc.

Le manipulateur peut donc se composer uniquement d'un levier en communication avec la ligne et qu'on abaisse autant de fois qu'on veut pour le mettre en communication avec la pile pour envoyer le courant. Quant au récepteur, il se composera simplement d'un électro-aimant faisant mouvoir une armature, dont la tige munie d'un crayon, d'une plume ou d'une pointe sèche, viendra marquer sur un papier se déroulant d'un mouvement uniforme.

On peut aussi utiliser le sens du courant en le changeant à volonté au moyen d'un manipulateur spécial. Dans ce cas, le récepteur doit contenir un aimant qui est attiré ou repoussé suivant que le courant passe dans un sens ou dans l'autre ; dans ce cas, un simple galvanomètre peut suffire. En combinant le nombre des déviations de l'aiguille et leur sens, on obtient un vocabulaire aussi complet qu'on peut le désirer.

Il y a un autre genre de signaux qui paraît au premier abord plus difficile à obtenir, mais qui souvent est préférable, en ce que les lettres se transmettent directement. L'armature de l'électro-aimant mise en mouvement à chaque émission de courant fait tourner une roue d'un angle déterminé. Quant à l'émission, elle se fait au moyen d'une roue semblable à la première qu'on fait tourner à la main ; cette roue fait osciller une tige qui vient établir la communication de la ligne avec la pile ; on envoie donc le courant un nombre de fois déterminé par l'angle dont on fait tourner la roue. Les lettres de l'alphabet ou des signes conventionnels sont marqués sur les deux roues, et les mêmes lignes se retrouvent toujours placées de la même manière, et en convergeant d'un point de repère fixe, on transmet un quelconque d'entre eux.

Machines électro-magnétiques. — Le mouvement d'une armature produite par l'aimantation et la désaimantation du fer doux

peut être utilisé pour mettre en mouvement une roue, un volant, un mécanisme quelconque, en un mot pour produire une force motrice ; l'électricité joue donc ici le rôle de la chaleur développée par la combustion dans les machines à vapeur, et le moyen de l'employer, ou en d'autres termes la forme des machines peut varier à l'infini.

La machine la plus simple à imaginer consiste en une armature mobile entre deux électro-aimants. Le courant parcourant l'un d'eux attire l'armature ; on l'interrompt alors pour le faire passer sur l'autre ; l'armature revient donc, et on a un mouvement continu de va-et-vient analogue à celui du piston d'une machine à vapeur : on peut l'employer à faire tourner une roue. Quant à la fermeture du courant par l'un ou l'autre des électro-aimants, elle peut très-facilement s'opérer par l'armature elle-même, qui en venant appuyer contre un des électro-aimants, vient toucher un butoir, et ferme le circuit par l'autre.

On a essayé de bien des manières d'augmenter la force développée par les machines électro-magnétiques ; mais, quelque parfait que soit le système adopté, il y a un maximum qu'on ne peut dépasser, et ce maximum est assez faible eu égard à la dépense qu'occasionnent les piles.

Cela tient à ce que la force magnétique développée dans les électro-aimants n'agit qu'à une très-faible distance ; et bien que la force soit considérable au contact, puisqu'on peut faire supporter plus de mille kilogrammes à un électro-aimant de dimension moyenne, dès que l'armature est un peu éloignée, la force décroît considérablement. On a construit des machines électro-magnétiques de la force d'un cheval et même plus, en multipliant les électro-aimants et les armatures ; mais comme nous l'avons dit plus haut, la dépense est assez considérable, et n'est pas en rapport avec l'effet obtenu.

LOIS DE L'INTENSITÉ DES COURANTS.

Les propriétés des courants se manifestent avec une énergie variable suivant leur force; il est donc nécessaire de connaître la relation qui existe entre l'intensité d'un courant et la composition du circuit qu'il traverse.

Le courant est produit par le mouvement des fluides électriques dans un conducteur, et ces fluides sont développés par l'action chimique au contact du zinc et de l'acide sulfurique. Le mouvement doit donc avoir lieu dans l'acide et dans le zinc comme il a lieu dans un conducteur extérieur, ou, en d'autres termes, la pile doit être parcourue par le même courant que le conducteur interpolaire. L'acide se charge, comme nous avons vu, d'électricité positive, tandis que le zinc se charge d'électricité négative; le fluide positif marche donc dans la pile du zinc au cuivre en traversant l'acide. Ainsi, en résumé, il y a dans la pile un courant qui va du pôle négatif au pôle positif; ce courant continue son trajet dans le conducteur extérieur du pôle positif au pôle négatif. On peut facilement constater ce fait en présentant une aiguille aimantée au-dessus de la pile.

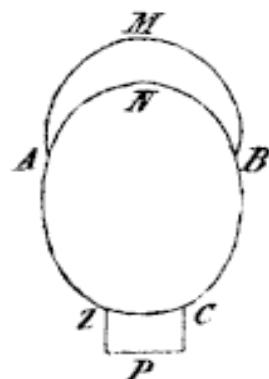
L'intensité d'un courant n'est autre que la quantité d'électricité qui traverse une section d'un conducteur dans l'unité de temps. Lorsqu'on établit la communication d'un pôle d'une pile à l'autre au moyen d'un fil métallique, le fluide électrique se répand dans le fil, suivant une loi difficile à établir; mais au bout d'un temps très-court, il s'établit un mouvement régulier d'électricité d'un pôle de la pile à l'autre, qui constitue un courant, et reste le même tant qu'on ne change pas la pile ou le conducteur. Pour que cet état puisse persister, il faut que chaque section soit traversée dans le même temps par la même

Quantité d'électricité, de même que, dans un cours d'eau, la quantité d'eau qui passe par une section dans un temps donné est la même partout, bien que certaines parties puissent avoir des largeurs différentes. S'il n'en était pas ainsi, l'électricité s'accumulerait dans certaines parties, et on n'aurait pas de courant ou d'écoulement continu. La conséquence de cette observation est que l'intensité d'un courant doit être la même à tous les points du circuit, quelle que soit sa composition. On peut facilement le démontrer par l'expérience; si, en effet, on présente diverses parties d'un circuit à l'aiguille aimantée, ou si on place un galvanomètre en des points différents, on observe partout la même déviation. On peut encore s'en assurer en pliant le fil conducteur de façon à avoir deux parties du circuit voisines et traversées par le courant en sens contraire; on reconnaît que l'ensemble n'a pas d'influence sur l'aiguille, d'où on peut conclure que les deux actions sont égales. On peut démontrer de la même manière que le courant qui traverse la pile a la même intensité que le courant extérieur.

La propagation de l'électricité dans un circuit tient à la répulsion que les molécules électriques exercent les unes sur les autres; l'intensité doit donc dépendre de la force avec laquelle s'exerce cette répulsion ou de la tension électrique développée dans la pile. En outre, les corps que traverse le courant opposent à ce mouvement électrique une certaine résistance qui doit faire varier aussi cette intensité. Il y a donc, pour déterminer les lois de l'intensité des courants, à tenir compte : 1^o de la composition du circuit ou de la résistance des corps qui le composent; 2^o du nombre des éléments et de la tension ou force électro-motrice qu'ils développent. Ces lois ont été trouvées par M. Ohm, au moyen de considérations purement théoriques. Elles ont été un peu plus tard déterminées expérimentalement par M. Pouillet: nous allons voir comment on y a été conduit.

Résistances. — La première étude à faire consiste à voir l'in-

fluence que peut exercer sur l'intensité du courant le remplacement d'une portion du circuit par un conducteur d'une nature différente.



Considérons une pile P, aux deux pôles de laquelle sont attachés deux fils conducteurs ZA et CB, un galvanomètre étant placé sur le parcours du fil CB. Si l'on réunit au moyen d'un fil AMB les deux points A et B, le courant s'établit et fait dévier l'aiguille du galvanomètre. La déviation, et par suite l'intensité du courant augmentent, si l'on remplace le fil AMB par un autre de même métal et de même section, mais plus court, ANB, ou de même longueur, mais d'une section plus grande; elle diminue au contraire, si l'on remplace AMB par un fil de même section et plus long, ou de même longueur et d'une section moindre; enfin l'intensité reste la même, si le fil par lequel on remplace AMB est deux fois, trois fois, quatre fois plus long, mais si en même temps la section est double, triple ou quadruple de celle de AMB. On peut donc, dans un circuit, remplacer un fil conducteur par un autre de même nature, si le rapport de la longueur à la section reste constant.

Quand les fils AMB et ANB ne sont pas de même nature, mais ont des sections égales, les longueurs qu'il faut pour obtenir la même intensité de courant sont différentes. Si le fil ANB doit être deux, trois ou quatre fois plus long que AMB, on dit que sa

résistance est deux, trois ou quatre fois moindre, ou que sa conductibilité est deux, trois ou quatre fois plus grande. On a des tables qui donnent la conductibilité des divers corps à la ligne. En résumé, un fil peut en remplacer un autre de même section, mais de nature différente, si le rapport de la longueur à la conductibilité est le même dans les deux fils, ou si l'on a :

$$\frac{l}{k} = \frac{l'}{k'},$$

l et l' étant les longueurs des deux fils, k et k' leur conductibilité.

Enfin, dans le cas plus général où les deux fils ont des sections inégales et sont de nature différente, on trouve qu'ils ont la même résistance et peuvent se remplacer l'un par l'autre dans un circuit, si les rapports des longueurs aux produits des sections par les conductibilités sont égaux, ou si l'on a :

$$\frac{l}{k s} = \frac{l'}{k' s'},$$

l et l' étant les longueurs des deux fils, k et k' les conductibilités, s et s' les sections.

Considérons maintenant un fil dont on prend la section pour unité de surface et la conductibilité pour unité ; une longueur déterminée de ce fil pourra remplacer une longueur quelconque d'un fil d'une autre section et d'un métal différent. Si l est la longueur, k la conductibilité et s la section de ce fil, la longueur du fil pris pour unité, qui pourra remplacer ce conducteur, est évidemment $l' = \frac{l}{k s}$.

Ainsi, par exemple, supposons que le fil pris pour unité soit un fil de cuivre de 1 millimètre carré de section, la longueur de

ce fil pourrait remplacer un fil de fer de 4 millimètres carrés de section, de 150 mètres de longueur, et :

$$\frac{150}{4 \times \frac{1}{7}} \text{ ou } 262 \frac{1}{7},50,$$

la conductibilité du fer par rapport au cuivre étant $\frac{1}{7}$.

Cette longueur d'un fil normal, qui offre la même résistance qu'un autre conducteur, se nomme longueur réduite. On voit que la longueur réduite d'un fil est proportionnelle à sa longueur, et en raison inverse de sa résistance et de sa conductibilité. Quant au fil qui sert à établir les longueurs réduites, il est évidemment arbitraire, et varie suivant les circonstances et les expériences qu'on veut faire. Ainsi, on peut prendre le fil de cuivre, qui a pour section 1 millimètre carré; dans les expériences télégraphiques, on prend pour unité de longueur réduite le fil de fer de 4 millimètres de diamètre, qui sert à la construction des lignes électriques. Ainsi, l'on dit, par exemple, que le fil d'une bobine a pour résistance 200 kilomètres, c'est-à-dire que sa longueur réduite est 200 kilomètres de fil de fer de 4 millimètres de diamètre, ou que l'interposition du fil de la bobine ou de ces 200 kilomètres dans un circuit donneraient la même intensité de courant.

Quand on connaît la longueur réduite, exprimée en fil d'une certaine espèce, il est très-aisé de l'exprimer en fil d'une nature différente. Ainsi, la bobine qui avait pour résistance 200 kilomètres de fil de fer de 4 millimètres, aura pour longueur réduite, exprimée en fil de cuivre de 1 millimètre de section,

$$\frac{200}{12 \cdot \frac{1}{7}}$$

ou 116 kilomètres environ, puisque la section du fil de 4 millimètres de diamètre est d'environ 12 millimètres, et que la conductibilité du fer est $\frac{1}{7}$.

Lorsqu'on connaît la longueur, la section et la conductibilité d'un conducteur, on a donc facilement sa longueur réduite; mais on peut aussi l'obtenir sans aucune de ces données, au moyen d'une expérience très-simple : on place le conducteur dans un circuit quelconque en faisant communiquer les deux extrémités avec les deux pôles d'une pile et en faisant traverser au courant le fil d'un galvanomètre; on examine la déviation obtenue. On remplace alors le conducteur par le fil qui sert à comparer les résistances, ou par un fil dont on connaît exactement la conductibilité et la section, et l'on fait varier la longueur de ce fil jusqu'à ce que l'on ait la même déviation. Si le fil avec lequel on fait un essai est celui qu'on veut prendre pour avoir la mesure de la résistance, la longueur trouvée est précisément la longueur réduite, sinon il est facile de la calculer, puisqu'on connaît la conductibilité et la section du fil d'essai.

Rhéostat.— L'instrument qui sert à mesurer les résistances se nomme rhéostat. La forme la plus simple qu'on puisse lui donner est celle d'un fil métallique très-fin tendu sur une planche; on met l'une des extrémités en communication avec l'un des pôles de la pile; un curseur peut se mouvoir le long d'une règle graduée parallèle au fil; il est muni d'un ressort et communique avec le galvanomètre et l'autre pôle de la pile. La partie du fil qui se trouve dans le circuit est seulement celle qui est comprise entre l'extrémité communiquant avec le pôle, en face du zéro de l'échelle, et le curseur. A mesure qu'on fait mouvoir le curseur en l'éloignant du zéro, la résistance introduite augmente, et l'on voit la déviation de l'aiguille diminuer. On arrête le curseur au moment où la déviation de l'aiguille du galvanomètre est la même

que celle obtenue précédemment avec le conducteur dont on cherche la résistance.

On forme souvent le rhéostat de deux cylindres parallèles dont l'un est en bois et l'autre en cuivre. Un fil fin de cuivre est enroulé sur le cylindre de bois et fixé par son extrémité libre au cylindre de cuivre. Les cylindres sont munis de deux roues dentées, qui engrènent l'une avec l'autre, de sorte qu'ils tournent toujours en sens contraire, et le fil fin, quand il se déroule de l'un d'eux, s'enroule sur l'autre.

La seule résistance qu'éprouve le courant est la portion du fil fin enroulée sur le cylindre de bois, car on peut négliger la résistance du cylindre de cuivre. Quant à l'opération, elle se conduit comme nous l'avions indiqué plus haut. On ajoute souvent au rhéostat des bobines de fil dont on a calculé d'avance la résistance et qu'on introduit à volonté dans le circuit.

Conductibilité. — Le rhéostat peut servir à déterminer la conductibilité des différents corps. Il suffit, pour faire cette opération, de prendre des fils formés de différentes substances, mais de longueurs et de sections égales, et de chercher les longueurs réduites qui leur correspondent; les conductibilités sont en raison inverse de ces longueurs. On trouve ainsi que si une longueur donnée peut remplacer un fil de cuivre, il faut une longueur sept fois plus grande pour remplacer un fil semblable de fer, et quatre fois plus grande pour remplacer un fil semblable de platine. Le cuivre conduit donc sept fois mieux que le fer et quatre fois mieux que le platine, ou, si l'on prend la résistance du cuivre pour unité, celle du fer est $\frac{1}{7}$, celle de la platine $\frac{1}{4}$.

Pour avoir la conductibilité des liquides, on les renferme dans de petits tubes dont on connaît la longueur et la section, et on

les fait traverser par le courant comme les fils ordinaires. On trouve ainsi que la conductibilité du cuivre étant 1, celle du mercure est $\frac{1}{38}$, celle d'une dissolution de sulfate de cuivre $\frac{1}{16,000,000}$, et celle d'une dissolution de sulfate de fer $\frac{1}{27,000,000}$. Les liquides offrent donc une résistance au courant infiniment supérieure à celle des métaux.

Lois du courant électrique. -- Nous avons indiqué déjà la première loi qui consiste en ce que l'intensité est la même à tous les points d'un circuit, quelle que soit d'ailleurs la manière dont il est formé. Quant à cette intensité, elle varie avec la composition du circuit, c'est-à-dire la résistance des conducteurs qui réunissent les deux pôles, le nombre et la nature des éléments qui composent la pile. On doit donc étudier successivement l'influence de ces deux causes.

En premier lieu, un circuit quelconque peut être réduit à un fil de longueur, de conductibilité et de section connues, tel que le fil d'un rhéostat, puisqu'on peut, sans changer l'intensité, remplacer successivement tous les conducteurs par un fil offrant la même résistance et qui représente la longueur réduite.

Supposons donc qu'on ait une pile dont les deux pôles sont réunis par un conducteur, une boussole étant dans le circuit; désignons par I l'intensité du courant observée à l'aide de la boussole, et par a la résistance de tout le circuit, c'est-à-dire du conducteur interpolaire et de la boussole. On ajoute une nouvelle résistance au moyen du galvanomètre, l'intensité du courant diminue, soit I' la nouvelle intensité et b la résistance totale; on répète la même expérience en cherchant l'intensité I'' , I''' , etc.,

pour des résistances a , b , etc. On trouve alors que si l'on ajoute aux résistances a , b , c , d , etc., une quantité constante m , les intensités sont proportionnelles aux valeurs $\frac{1}{m+a}$ $\frac{1}{m+b}$

$\frac{1}{m+c}$ $\frac{1}{m+d}$, etc., de telle sorte qu'on a :

$$I : I' : I'' : I''' :: \frac{1}{m+a} : \frac{1}{m+b} : \frac{1}{m+c} : \frac{1}{m+d}$$

Les intensités sont donc inversement proportionnelles aux résistances a , b , c , d , pourvu qu'on y ajoute une quantité constante.

La quantité m qu'il faut ajouter tient uniquement à la pile; car si, l'expérience faite avec un seul élément ayant donné m , on la répète avec deux pareils, elle devient $2m$, avec trois, $3m$; et ainsi de suite; elle est donc proportionnelle au nombre des éléments, et il est facile de reconnaître qu'elle n'est autre que la résistance de la pile elle-même.

On peut, en effet, déterminer par une expérience directe la résistance d'une pile. On prend deux éléments semblables qu'on juxtapose, en faisant communiquer entre eux les deux pôles de même nom. Si l'on complète le circuit, on n'a pas de courant, puisque les deux éléments donnent deux courants égaux et contraires qui s'annulent. On place les deux éléments ainsi disposés dans un circuit, comprenant une pile et un galvanomètre, et l'on cherche la résistance comme celle d'un conducteur ordinaire, en les remplaçant par le fil d'un rhéostat. On trouve ainsi la résistance des deux éléments, d'où l'on conclut celle de toute une pile, en multipliant celle d'un seul par le nombre des éléments.

On reconnaît ainsi que la quantité qu'il faut ajouter à la résistance extérieure pour lui rendre l'intensité du courant inversement proportionnelle, est précisément la résistance de toute une pile,

pile. Ainsi, dans la relation trouvée plus haut, $m + a$, $m + b$, $m + c$, etc., représentent la résistance ou la longueur réduite de tout le circuit, c'est-à-dire celle du conducteur interpolaire augmentée de celle de la pile.

On peut donc poser cette loi, que l'intensité du courant est en raison inverse de la résistance du circuit, en comprenant dans cette résistance tous les conducteurs que parcourt le courant et la pile elle-même.

Pour trouver l'influence du nombre des éléments, on cherche l'intensité du courant en faisant varier leur nombre. Ainsi, supposons qu'on prenne un élément dont la résistance est m , et un conducteur interpolaire de résistance a , soit I l'intensité. On ajoute un élément; mais comme en l'ajoutant on augmente la résistance d'une quantité égale à m , pour conserver la même longueur réduite totale, on diminue la résistance a du conducteur interpolaire de la même quantité m , ce qui est facile au moyen du rhéostat. On trouve ainsi une nouvelle intensité I' .

On répète la même opération en ajoutant un troisième élément et en diminuant encore la résistance du conducteur d'une nouvelle quantité égale à m , soit I'' l'intensité.

On trouve que l'intensité I' est double de I , et I'' triple; donc l'intensité du courant est proportionnelle au nombre des éléments.

D'après ces deux lois, on peut conclure que si n représente le nombre des éléments, R la résistance interpolaire et R' la résistance de la pile, l'intensité I a pour valeur :

$$I = \frac{n}{R + R'}$$

ou encore, si r est la résistance d'un seul des éléments de la pile, celle de la pile entière est nr , et la formule devient :

$$I = \frac{n}{R + nr}.$$

Cette formule peut servir à résoudre toutes les questions relatives aux piles. Supposons, par exemple, dans un poste télégraphique que dix éléments Daniell, ayant chacun une résistance égale à 1 kilomètre de fil de même nature que celui de la ligne, donnent sur un fil télégraphique de 20 kilomètres de longueur une certaine intensité I , on peut, par une simple règle de trois, trouver l'intensité qu'on aurait avec un autre nombre d'éléments, 20, par exemple, sur une ligne qui aurait une longueur quelconque, supposons 60 kilomètres.

On a, en effet, en nommant x cette intensité inconnue :

$$x : I :: \frac{20}{60 + 20} : \frac{10}{20 + 10},$$

$$\text{ou } x : I :: \frac{1}{9} : \frac{1}{3},$$

$$\text{ou } x : I :: 1 : 3.$$

L'intensité obtenue dans le second cas est donc $\frac{1}{3}$ de l'intensité qu'on avait d'abord.

Forces électro-motrices. — Lorsqu'on a deux piles formées différemment, par exemple une pile Daniell et une pile Bunsen, la résistance totale peut être la même, ainsi que le nombre des éléments, et pourtant l'intensité du courant est différente, ce qui tient à ce que le développement d'électricité n'est pas identique. Il s'en produit plus dans un élément Bunsen que dans un élément Daniell ; l'intensité du courant doit donc être différente.

On nomme force électro-motrice l'intensité qu'aurait le courant d'une pile si la résistance totale était égale à l'unité. Ainsi, en nommant F la force électro-motrice d'une pile, si la résistance au lieu d'être I devient R , l'intensité du courant sera $\frac{F}{R}$.

Si maintenant F est la force électro-motrice d'un seul élément, et si n est leur nombre, r la résistance de chacun, et enfin R la résistance extérieure et la pile, la formule générale de l'intensité du courant est :

$$I = \frac{n \cdot F}{nr + R}.$$

Détermination de la résistance des piles. — Nous avons déjà dit comment on peut déterminer la résistance d'un élément ; on prend deux éléments pareils qu'on accouple en retournant l'un d'eux, et on cherche la résistance de cet assemblage comme celle d'un conducteur ordinaire.

On peut déterminer cette résistance de plusieurs autres manières : ainsi, supposons qu'on prenne un seul élément, et qu'on réunisse les deux pôles par un conducteur de résistance R , on a :

$$I = \frac{F}{r + R}.$$

On change cette résistance en ajoutant un nouveau conducteur au moyen du rhéostat, et on obtient un courant d'une intensité différente ; I' étant cette nouvelle intensité et R' la nouvelle résistance, on a pour ce même élément :

$$I' = \frac{F}{r + R'}.$$

Si on prend le rapport, on a :

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

Or le rapport $\frac{I}{I'}$ est connu par les indications du galvanomètre ; r est donc la seule inconnue dans cette équation.

Supposons, par exemple, que le premier courant donne à la boussole du sinus une déviation de 15 degrés et le second une déviation de 12 degrés, le rapport $\frac{I}{I'}$ sera $\frac{\sin. 15^\circ}{\sin. 12^\circ}$; et, comme on peut prendre à peu près dans ces limites le rapport des angles pour celui des sinus, on a :

$$\frac{I}{I'} = \frac{15}{12} = \frac{5}{4},$$

donc l'équation devient :

$$\frac{5}{4} = \frac{r + R'}{r + R},$$

Elle donne :

$$\begin{aligned} 4r + 4R' &= 5r + 5R, \\ r &= 4R' - 5R, \end{aligned}$$

Si l'on prend pour unité le fil de fer de 4 millimètres ^{de} diamètre, et si $R' = 7$ kilomètres, et $R = 5$ kilomètres, ^{on} aura :

$$r = 3 \text{ kilomètres.}$$

On trouve par cette méthode qu'un élément Daniell, semblable à ceux qu'on emploie ordinairement dans les postes télégraphiques français, c'est-à-dire de 0^m,15 de hauteur et monté avec du sulfate de cuivre et de l'eau pure, offre une résistance égale à 800 mètres environ de fil de fer de 4 millimètres de diamètre. Cette résistance varie avec l'état de saturation du liquide et ^{la} hauteur de l'eau dans les vases, etc. — Elle va quelquefois jusqu'à 2 et 3 kilomètres.

Un élément Bunsen ordinaire, bien préparé, à une résistance égale, a environ 150 mètres.

La résistance d'un élément varie naturellement avec sa dimension, et comme la résistance d'un corps solide ou liquide est inversement proportionnelle à sa section, on peut admettre que la résistance d'un élément est en raison inverse de sa surface. Ainsi, elle est moitié moindre lorsque la surface est double; elle n'est plus qu'un tiers si la surface est triple, et ainsi de suite.

Détermination des forces électro-motrices.— La force électro-motrice est, ainsi que nous l'avons vu, l'intensité du courant que l'on obtiendrait si la résistance totale était égale à l'unité. Ainsi, pour un élément Daniell dont la résistance est 800 mètres, c'est l'intensité qu'aurait le courant si l'on réunissait les deux piles par un conducteur ayant 200 kilom. de longueur, le circuit ayant alors 1 kilomètre de longueur.

Si l'élément avait plus de 1 kilomètre de résistance, on ne pourrait pas déterminer directement la force électro-motrice, puisqu'en réunissant les deux pôles sans intermédiaire on aurait une résistance supérieure à 1. Néanmoins, on peut la déduire de l'intensité connue avec une résistance extérieure déterminée. Supposons que la résistance de l'élément soit 3 kilomètres, et qu'avec une résistance extérieure de 5 kilomètres on observe à la boussole une intensité I , on aura :

$$I = \frac{F}{3 + 5},$$

d'où $F = 8 I$.

Ainsi, toutes les fois qu'on veut fixer une force électro-motrice, il faut faire connaître avec quelle unité de résistance elle est prise, et pour que l'intensité du courant soit bien définie, avec quel galvanomètre elle est mesurée.

On ne cherche pas ordinairement la valeur absolue des forces électro-motrices, mais on a souvent besoin de les comparer, de

telle sorte qu'en prenant l'une d'elles pour unité toutes les autres peuvent s'exprimer par rapport à elle. Un élément Daniell ayant pour force électro-motrice 1, un élément de Grove aura par exemple 3, et si l'on connaît l'intensité du courant donné par le premier élément avec un circuit de résistance connue, on aura facilement l'intensité produite par un nombre quelconque d'éléments de la seconde pile sur un circuit.

On obtient le rapport de deux forces électro-motrices au moyen de deux expériences très-simples, quand on a d'abord déterminé la résistance des éléments.

Supposons qu'en prenant n éléments, ayant chacun une résistance r , et en faisant parcourir au courant un conducteur de résistance R , on observe une intensité I , on aura :

$$I = \frac{n F}{nr + R}$$

En nommant F la force électro-motrice de chaque élément, on prend un nombre n' des éléments qu'on veut comparer aux premiers, et dont la résistance r' a été déterminée d'avance. On fait traverser au courant un conducteur de résistance R' , soit I' l'intensité. Si F' est la force électro-motrice des seconds éléments, on a :

$$I' = \frac{n' F'}{n'r' + R'},$$

et en prenant le rapport,

$$\frac{I}{I'} = \frac{n (n'r' + R)}{n' (nr + R)} \times \frac{F}{F'},$$

d'où l'on déduit :

$$\frac{F'}{F} = \frac{n (n'r' + R)}{n' (nr + R)} \times \frac{I}{I'}.$$

Supposons que les premiers éléments aient une résistance égale à 0^{kil.},800 et soient en nombre égal à 20, que les autres aient pour résistance 2 kilomètres et soient en nombre égal à 10, enfin que la résistance R soit égale à 75 kilomètres, et R' à 180 kilomètres, on aura :

$$\frac{F'}{F} = \frac{20 (10 \times 2' + 180)}{10 (20 \times 0,8 + 75)} \times \frac{1}{I'},$$

$$\text{ou } \frac{F'}{F} = \frac{400}{91} \times \frac{I'}{I}.$$

Si les premiers éléments ont donné 20 degrés et les autres 15, on pourra prendre le rapport des arcs pour celui des degrés, ce qui donnera :

$$\frac{F'}{F} = \frac{400}{91} \times \frac{15}{20} = \frac{300}{91}.$$

Le rapport des forces locomotrices est donc égal à peu près à $\frac{1}{3}$.

On peut encore procéder de la manière suivante : on prend un certain nombre d'éléments pareils dont on forme une pile ; on accouple de la même manière les éléments qu'on veut comparer aux premiers, et on place les deux piles dans le même circuit, mais en les disposant de façon à ce que les deux courants marchent en sens contraire. Supposons que la première pile comprenne n éléments dont la force électro-motrice est R, et la seconde n' éléments dont la force électro-motrice est R', l'intensité du courant produite par la première pile est $\frac{nF}{R}$, en nommant R la résistance totale du circuit qui comprend celle des deux piles et des conducteurs intermédiaires. La seconde pile

donne un courant contraire au premier, et dont l'intensité est $\frac{n' F'}{R}$, R étant le même.

Si on a placé un galvanomètre dans le trajet du fil, et si l'on n'observe pas de déviation de l'aiguille, les deux courants sont égaux, d'où l'on conclut :

$$n F = n' F',$$

$$\text{ou } \frac{F}{F'} = \frac{n'}{n}.$$

Ainsi les forces électro-motrices sont en raison inverse du nombre d'éléments qu'il faut opposer les uns aux autres pour n'avoir pas de déviation. On arrive facilement par tâtonnements à ce nombre en ôtant ou en ajoutant des éléments jusqu'à ce que l'aiguille de la boussole reste stationnaire.

On a fait de nombreuses expériences pour comparer les forces électro-motrices; nous nous bornerons à dire qu'elles dépendent uniquement de la nature des corps qui se combinent dans la pile et nullement de la dimension des éléments; ainsi un élément de grande dimension a la même force électro-motrice qu'un autre de petite dimension; nous rappellerons seulement que sa résistance est moindre.

Quant à la force électro-motrice totale d'une pile, elle est, comme nous l'avons déjà dit, proportionnelle au nombre des éléments qui la composent.

Si l'on prend un certain nombre d'éléments, dix par exemple, et si l'on réunit tous les pôles positifs et également tous les pôles négatifs en reliant ensemble toutes les lames de zinc et toutes les lames de cuivre, on forme un seul grand élément dont la force électro-motrice est la même que celle d'un petit

élément, mais dont la résistance est dix fois moindre. Si, au contraire, on accouple les éléments comme dans une pile ordinaire, l'ensemble aura une force électro-motrice dix fois plus grande que celle d'un élément, et en même temps une résistance dix fois plus grande.

Forme à donner aux piles. — Les lois qui précèdent permettent de déterminer la forme de piles qui convient le mieux, suivant la composition du circuit extérieur, pour obtenir la plus grande intensité possible.

Si, en effet, on désigne par n le nombre des éléments, par F leur force électro-motrice, qui reste toujours la même quelle que soit leur dimension, par r la résistance de chacun d'eux, par R la résistance extérieure, et par I l'intensité du courant, on a, ainsi que nous avons vu :

$$I = \frac{n F}{nr + R}.$$

Supposons en premier lieu que les deux pôles soient reliés directement sans conducteur intermédiaire, ou du moins ce conducteur ayant une résistance infiniment petite, alors R est nul et

$$I = \frac{n F}{n r} = \frac{F}{r}.$$

Ainsi dans ce cas l'intensité ne dépend pas du nombre des éléments. Il est évident, en effet, que si l'on ajoute des éléments, si on double par exemple leur nombre, on double la force électro-motrice de la pile, mais on augmente dans la même proportion la résistance du circuit, de sorte que l'intensité doit rester la même.

Cette intensité est en raison inverse de la résistance r d'un

élément, de sorte qu'elle sera d'autant plus grande que la dimension sera plus grande; elle sera proportionnelle à sa surface.

Dans le cas extrême où le circuit a une très-grande résistance par rapport à celle de la pile, 4 ou 500 kilomètres par exemple, tandis que la pile a 30 ou 40 kilomètres de résistance au plus, on peut négliger la résistance nr de la pile devant celle R du conducteur, et on a :

$$I = \frac{n F}{R}.$$

Ainsi la résistance est proportionnelle au nombre des éléments; et comme la force électro-motrice F est toujours la même pour une nature donnée d'élément, quelle que soit l'étendue de la surface de contact, l'intensité ne dépend pas de l'étendue des éléments; il est donc indifférent d'employer des petits ou des grands éléments.

On voit, en résumé, que si la résistance extérieure est *faible* par rapport à celle de la pile, on doit employer peu d'éléments et leur donner une grande surface, tandis que si la résistance extérieure est très-considerable, on devra employer beaucoup d'éléments qui pourront avoir de petites dimensions.

Enfin dans le cas général où la résistance extérieure est *comparable* à celle de la pile, il est clair que l'intensité sera toujours d'autant plus grande que le nombre des éléments et leurs dimensions seront plus considérables; mais on peut se proposer pour problème de chercher, quand une surface de zinc étant donnée, en combien de parties il faudrait la découper pour former autant d'éléments et avoir la plus grande intensité de courant possible dans un circuit de résistance connue.

Comme exemple, supposons qu'on ait douze éléments Daniell,

qu'on peut, soit mettre à la suite les uns des autres pour former une pile, soit accoupler deux à deux et obtenir une pile de six éléments, soit accoupler trois à trois, et ainsi de suite.

Si l'on a une seule pile de douze éléments, l'intensité avec une résistance extérieure R est

$$I = \frac{12}{12r + R}.$$

Si l'on accouple les éléments deux à deux, la résistance de chacun est réduite de moitié puisque la surface est double, et l'intensité est

$$I = \frac{6}{6 \frac{r}{2} + R}.$$

Si les éléments sont accouplés trois à trois, on n'a plus qu'une pile de quatre éléments, qui donne une intensité égale à

$$I = \frac{4}{4 \frac{r}{3} + R}.$$

En accouplant quatre à quatre, on a :

$$I = \frac{3}{3 \frac{r}{4} + R}.$$

En accouplant six à six :

$$I = \frac{2}{2 \frac{r}{6} + R}.$$

Enfin, si les éléments sont tous disposés de façon à n'en for

mer qu'un seul grand, tous les pôles zinc étant réunis ainsi que les pôles cuivre, on aura :

$$I = \frac{1}{\frac{r}{12} + R}.$$

Admettons que la résistance des éléments r soit de 1 kilomètre, et la résistance R de 2 kilomètres, on aura :

$$I = \frac{12}{14} = 0,85, \text{ si les éléments sont à la suite l'un de l'autre ;}$$

$$I = \frac{6}{5} = 1,20, \text{ s'ils sont accouplés deux à deux,}$$

$$I = \frac{4}{\frac{4}{3} + 2} = 1,20, \quad \text{---} \quad \text{trois à trois,}$$

$$I = \frac{3}{\frac{3}{4} + 2} = 1,09, \quad \text{---} \quad \text{quatre à quatre,}$$

$$I = \frac{2}{\frac{2}{6} + 2} = 0,85, \quad \text{---} \quad \text{six à six,}$$

$$I = \frac{1}{\frac{1}{12} + 2} = 0,48, \text{ s'ils ne forment qu'un seul grand élément.}$$

On voit par ce tableau qu'on obtient donc le plus grand effet dans ce cas quand les éléments sont accouplés deux à deux ou trois à trois, et l'intensité du courant obtenu dans ces deux cas est la même.

On a également la même intensité lorsque les éléments sont tous placés à la suite les uns des autres et lorsqu'ils sont accouplés six à six.

Cet exemple montre bien combien la disposition de la pile a d'influence sur le courant produit.

Si l'on résout le problème généralement, et si l'on admet que la surface totale du zinc puisse être facilement divisée en autant de parties qu'on veut, au lieu de pouvoir l'être seulement en douze, comme dans le cas précédent, on trouve qu'on obtient la plus grande intensité possible quand la résistance de la pile est égale à la résistance extérieure.

Force magnétique maximum des électro-aimants. — On peut encore, à l'aide des lois qui précédent, déterminer la manière dont doivent être formées les bobines des électro-aimants pour développer la plus grande force magnétique possible.

Nous avons vu que le magnétisme est sensiblement proportionnel au nombre de tours et à l'intensité du courant. Si donc on désigne par I l'intensité du courant, par p le nombre de tours du fil, et par A le magnétisme développé, on aura :

$$A = p I.$$

F étant la force électro-motrice de toute la pile, R la résistance de tous les conducteurs, en exceptant toutefois le fil de la bobine de l'électro-aimant, et r la résistance de la bobine,

$$I = \frac{F}{R + r};$$

on a donc pour le magnétisme développé

$$A = \frac{n F}{R + r}.$$

si a représente la résistance de chaque tour du fil de la bobine :

$$r = na,$$

ou $A = \frac{n F}{R + na}.$

On voit par cette formule que si l'on fait croître le nombre de tours, la valeur de A va continuellement en augmentant. Il semble donc qu'il y a avantage à ajouter indéfiniment des tours à une bobine d'électro-aimant; mais la loi que nous avons posée n'est pas parfaitement exacte.

A mesure que les tours s'éloignent, l'action sur le fer doux du courant qui les traverse diminue; pourtant, jusqu'à une certaine limite d'éloignement, on peut sensiblement la considérer comme étant la même, de sorte qu'il faut éviter de dépasser cette limite qui est d'environ 12 millimètres, car on augmenterait la résistance sans augmenter dans le même rapport l'action magnétique. Ainsi l'on doit toujours remplir tout cet espace, et si l'on veut faire croître le nombre des tours, il faut en même temps diminuer la section, ce qui modifie la formule que nous venons de donner.

Désignons par b la résistance qu'aurait le fil de la bobine s'il était disposé de façon à ne faire qu'un seul tour en occupant tout l'espace annulaire compris dans la limite d'action. Si l'on fait deux tours, au lieu d'un seul, la longueur sera double; mais en même temps la section sera réduite de moitié, la résistance sera donc quatre fois plus grande, ou $4b$. Si l'on veut que le fil fasse trois tours, la longueur sera triple et la section trois fois moindre, la résistance sera neuf fois plus grande, ou $9b$. Si le fil fait quatre tours, elle sera $16b$, et ainsi de suite. Enfin, dans le cas général où le nombre de tours est n , la résistance r du fil de la bobine est $n^2 b$.

Ainsi, l'action magnétique

$$A = \frac{n I}{R + r}$$

devient :

$$A = \frac{n F}{R + n^2 b}.$$

Lorsque l'on fait croître n , A augmente jusqu'à une certaine limite, à partir de laquelle il diminue. Il est aisé, en effet, de s'assurer que A ne peut pas dépasser une certaine valeur, car, si l'on résout l'équation du second degré par rapport à n , on trouve :

$$\begin{aligned} A R + n^2 b A &= n F, \\ n^2 - \frac{F}{b A} n + \frac{R}{b} &= 0, \\ n &= \frac{F + \sqrt{F^2 - 4 A^2 b R}}{2 b A}. \end{aligned}$$

On voit, d'après cette formule, que la valeur de A^2 ne peut jamais être plus grande que $\frac{F^2}{4 b R}$; la plus grande force magnétique qu'on puisse développer est donc donnée par l'équation

$$\begin{aligned} A^2 &= \frac{F^2}{4 b R}, \\ \text{d'où, } A &= \frac{F}{2 \sqrt{b R}}. \end{aligned}$$

On en déduit :

$$n = \frac{F}{2 b A},$$

ou, en remplaçant A par la valeur précédente :

$$\begin{aligned} n &= \frac{F}{2 b \times \frac{F}{2 \sqrt{b R}}} \\ \text{ou } n &= \sqrt{\frac{R}{b}}. \end{aligned}$$

Tel est le nombre de tours que doit faire le fil pour qu'on obtienne le plus grand effet possible ; on déduit de cette formule :

$$n^2 = \frac{R}{b},$$

$$\text{ou enfin } n^2 b = R.$$

Or, $n^2 b$ est, comme nous l'avons dit plus haut, la résistance¹ du fil électro-aimant ; on voit donc que cette résistance doit être égale à celle R , de tout le conducteur extérieur dans laquelle figure la pile elle-même. L'expérience a pleinement confirmé ces résultats théoriques.

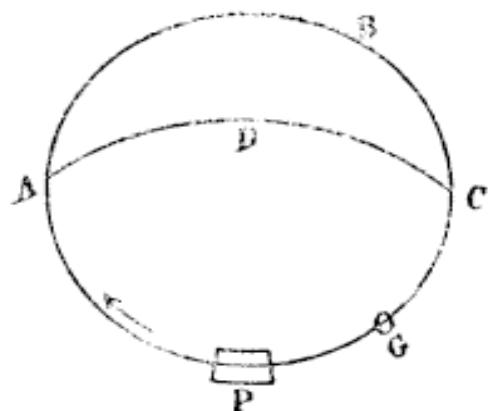
Si cette loi était rigoureusement appliquée, on devrait avoir autant d'électro-aimants différents que d'appareils, ou plutôt que de distances différentes entre les diverses stations télégraphiques ; certains électro-aimants auraient 100 kilomètres, d'autres 200, d'autres 400 et ainsi de suite. Il en résulterait une grande complication qu'on évite en prenant une moyenne. En France, presque tous les électro-aimants qui doivent être parcourus par le courant des lignes ont une résistance à peu près égale à 200 kilomètres de fil de fer de 4 millimètres de diamètre. Nous devons dire toutefois qu'il y a d'assez grandes variations provenant des qualités différentes des fils employés. Le métal dont ils sont formés est toujours du cuivre, qui est le plus conducteur des métaux usuels.

Pour les électro-aimants qui reçoivent seulement le courant d'une pile locale ou d'une pile éloignée au plus de quelques kilomètres, comme cela a lieu lorsque plusieurs postes se trouvent dans la même ville, on donne aux bobines des électro-aimants une résistance de 4 à 5 kilomètres.

On pourrait encore résoudre d'autres questions du même genre, supposer, par exemple, qu'on fasse varier en même temps la forme de la pile et celle des bobines ; mais ce que nous venons de dire suffit pour montrer comment elles peuvent être traitées.

COURANTS DÉRIVÉS.

Lorsque dans un circuit traversé par un courant on établit des communications nouvelles entre deux points, le courant se partage, et on dit qu'il y a dérivation. Le courant principal est d'ailleurs modifié, puisqu'on offre un nouveau passage à l'électricité; la résistance se trouve diminuée, et l'on peut en conclure qu'en général l'intensité est augmentée. On peut se proposer de chercher quelle est exactement l'intensité du courant dans toutes les parties du circuit. On arrive aux lois qui régissent les courants dérivés par des considérations très-simples fondées sur les lois précédentes; elles se vérifient d'ailleurs complètement par l'expérience.



Considérons un circuit, A B C G P, dans lequel se trouvent une pile en P, et en G un galvanomètre. Si l'on réunit les deux points, A et C par un nouveau fil conducteur, A D C, on voit la déviation de l'aiguille augmenter, et les deux parties, A D C et A B C, sont traversées par deux courants dérivés.

Supposons, en premier lieu, que les deux conducteurs, A B C

Novembre 1859.

40

et A D C, soient de même métal et qu'ils aient la même longueur et la même section; il est clair qu'il devra passer autant d'électricité par l'un que par l'autre, ou, en d'autres termes, que le courant partant de la pile P se divisera pour A en deux parties égales. Quant à la résistance qu'offrent au courant les deux fils ensemble, il est évident qu'elle est la même qu'un fil de même nature et de même longueur, mais d'une section double, comme si les deux conducteurs étaient rapprochés de façon à n'en former qu'un. Or, la résistance d'un tel fil est la moitié de celle de chacun des conducteurs A B C ou A D C. Si donc on désigne par F la forme électro-motrice de la pile, par R la résistance A P G C, en y comprenant celle de la pile et du galvanomètre, et par r la résistance de chacun des deux fils, A B C et A D C, la résistance totale sera $R + \frac{r}{2}$, et l'intensité du courant partant de la pile:

$$I = \frac{F}{R + \frac{r}{2}},$$

et, comme il en passe la moitié dans chaque dérivation, l'intensité du courant en A D C et en A B C sera :

$$I = \frac{1}{2} \times \frac{F}{R + \frac{r}{2}}.$$

En second lieu, supposons que les deux fils A B C et A D C, étant de même nature, aient des sections différentes. Le courant se partage inégalement, et il est évident que la quantité d'électricité qui traverse chaque fil est proportionnelle à sa section, de même que pour un fleuve, quand il existe une bifurcation, la quantité d'eau qui passe par chaque bras est proportionnelle à sa section. Ceci suppose que l'électricité se propage aussi bien à l'intérieur des corps conducteurs qu'à l'extérieur; c'est un résultat de l'expérience, et les lois des courants que nous avons exposées

plus haut en sont une preuve évidente. Ainsi, si s et s' représentent la section des deux conducteurs A B C et A D C, le courant en arrivant en A se divise en deux parties proportionnelles à s et s' , et qui passeront dans les fils A B C et A D C.

Si I représente l'intensité du courant depuis P jusqu'en A,

$I \times \frac{s}{s+s'}$ sera l'intensité suivant A B C,

et $I \times \frac{s'}{s+s'}$ suivant A D C.

Les deux conducteurs réunis offrent la même résistance qu'un conducteur de même nature qui aurait le même longueur, A B C, et une section égale à la somme des deux sections s et s' .

l et k représentant la longueur et la conductibilité des deux conducteurs dont les sections sont s et s' , la résistance des deux fils réunis est évidemment $\frac{l}{k(s+s')}$, et R étant la résistance A P G G, la résistance totale du circuit est

$$R + \frac{l}{k(s+s')} ,$$

l'intensité du courant en F A, $\frac{F}{R + \frac{l}{k(s+s')}} ,$

— en A B C, $\frac{F}{R + \frac{l}{k(s+s')}} \times \frac{s}{s+s'} ,$

— en A D C, $\frac{F}{R + \frac{l}{k(s+s')}} \times \frac{s'}{s+s'} .$

Examinons enfin le cas général où les deux dérivations ont

des longueurs, des sections et des conductibilités différentes. Soit r la résistance de A B C, et r' celle de A D C. On peut remplacer chacun de ces conducteurs par un fil dont la conductibilité prise pour unité étant la longueur serait égale à 1, en choisissant convenablement la section.

La résistance d'un conducteur étant le rapport de la longueur, ou produit de la section par la conductibilité, si la longueur et la conductibilité sont égales à 1, et si on nomme x la section que devrait avoir le fil pour remplacer A B C, on a

$$\frac{1}{x} = r \text{ ou } x = \frac{1}{r}.$$

De même, on peut remplacer le conducteur A D C par un fil de longueur et de conductibilité égales à 1 et dont la section x' serait :

$$x' = \frac{1}{r'}.$$

On peut ainsi supposer A B C et A D C remplacés par deux fils ayant la même longueur et la même conductibilité, et pour sections $\frac{1}{r}$ et $\frac{1}{r'}$. Le courant se comporte, par rapport à eux, comme dans le cas précédent; il se divise en deux parties proportionnelles à $\frac{1}{r}$ et $\frac{1}{r'}$, et la résistance de ces deux fils réunis est la même que celle d'un fil qui aurait une longueur égale à 1, une conductibilité égale à 1, et une section égale à la somme

$$\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}.$$

Or, pour avoir la longueur réduite d'un pareil fil, il reste à chercher la longueur d'un fil qui aurait pour section et pour

conductibilité l'unité, et qui offrirait la même résistance ; en nommant λ cette longueur, on a :

$$\lambda = \frac{1}{\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}} \text{ ou } \lambda = \frac{rr'}{r + r'}.$$

En résumé, les deux fils réunis offrent une résistance égale à

$$\frac{rr'}{r + r'}.$$

Si R représente encore la résistance A P G G, la résistance totale sera :

$$R + \frac{rr'}{r + r'},$$

et l'intensité du courant en P A et en P G :

$$\frac{F}{R + \frac{rr'}{r + r'}}.$$

Suivant A B G :

$$\frac{F}{R + \frac{rr'}{r + r'}} \times \frac{1}{\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}} \text{ ou } \frac{F}{R + \frac{rr'}{r + r'}} \times \frac{r'}{r + r'},$$

Et suivant A D G :

$$\frac{F}{R + \frac{rr'}{r + r'}} \times \frac{1}{\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}} \text{ ou } \frac{F}{R + \frac{rr'}{r + r'}} \times \frac{r}{r + r'},$$

Tous ces calculs sont très-élémentaires, ils montrent comment

doivent se traiter les questions relatives aux dérivations de courants.

Au lieu de deux conducteurs aboutissant en A et B, il peut y en avoir plusieurs. S'ils sont tous pareils, il est évident que le courant doit se partager également entre eux, et que leur ensemble offre la même résistance qu'un conducteur qui aurait la même longueur, serait de même nature, mais dont la section serait égale à la somme de toutes les sections.

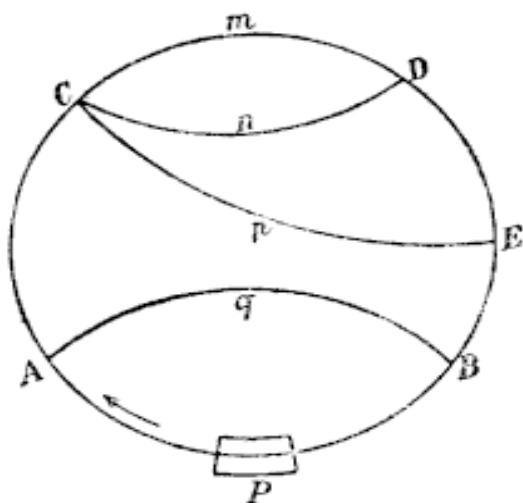
Si ces fils dérivants ont seulement des sections différentes, le courant se partagera proportionnellement à toutes les sections, et l'ensemble de tous ces conducteurs offrira encore la même résistance qu'un seul ayant la même longueur et une section égale à la somme de toutes les sections partielles.

Enfin si les conducteurs sont quelconques, et ont des résistances $r, r', r'', r''',$ on peut remplacer chacun d'eux par un autre, dont la longueur serait 1, la conductibilité 1 et la section $\frac{1}{r}$ pour le premier, $\frac{1}{r'}$ pour le second, $\frac{1}{r''}$ et $\frac{1}{r'''}$ pour les autres. L'intensité du courant dans chacun des fils dérivants est toujours inversement proportionnelle à sa résistance.

Ainsi, lorsqu'un nombre quelconque de dérivations aboutissent à deux points, on peut toujours déterminer la résistance d'un fil unique qui les remplacerait, et l'on peut, quelle que soit la composition du circuit et en procédant successivement, remplacer tous les conducteurs par un seul, avoir la résistance totale du circuit, et par suite l'intensité du courant partant de la pile. En allant ensuite de l'un des pôles à l'autre, et s'arrêtant à chaque point de bifurcation, on détermine l'intensité du courant dans chacun des conducteurs partiels.

Prenons pour exemple le circuit représenté ci-contre dans

lequel P est la pile, et qui comprend les conducteurs $A P B$, $A q B$, $A C$, $E B$, $C p E$, $E D$, $C n D$ et $C m D$.

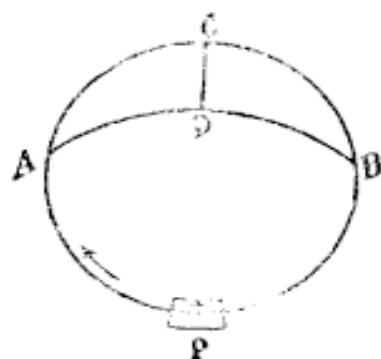


Les conducteurs $C m D$ et $C n D$ peuvent se remplacer par un seul. Soit r sa résistance; en ajoutant celle du fil $D E$, on a la résistance d'un fil unique qui remplacerait les trois fils $C m D$, $C n D$ et $D E$. Soit r' cette résistance; le nouveau fil r' et le fil $C p E$, qui aboutissent au même point, peuvent se remplacer par un seul, dont la résistance se détermine aisément; en ajoutant celle des conducteurs $C A$ et $E B$, on a la résistance d'un fil unique qui remplacerait les conducteurs $C m D$, $C n D$, $D E$, $C p E$, $C A$ et $E B$. Soit r'' sa résistance; en composant de la même manière r'' avec $A q B$, on a la résistance de l'ensemble de tous les fils qui aboutissent en A et B . Il suffit d'ajouter la résistance $A P B$ en y comprenant celle de la pile pour avoir la résistance de tout le circuit, et par suite l'intensité du courant qui part de la pile dans la direction $P A$, et qui y revient suivant $B P$.

Pour avoir l'intensité du courant dans chaque conducteur, on remarque qu'il se divise au point A en deux parties, dont l'une suit $A q B$ et l'autre $A C$, ou le fil qu'on peut imaginer à la place de tous les conducteurs aboutissant en A et B , moins le fil $A q B$, et dont nous avons désigné la résistance par r'' ; le courant dans

ces deux parties est inversement proportionnel à ces résistances, ce qui fait connaître l'intensité suivant $A q B$ d'une part, $A C$ et $B E$ de l'autre. Au point C le courant se divise encore, une portion suit le fil $A p E$, et l'autre les fils $C m D$, $C n D$ et $D E$. Enfin cette dernière intensité est égale à la somme des deux intensités suivant $C m P$ et $C n D$, et l'on a de la même manière la proportion qui traverse chacun d'eux.

Il se présente dans les dérivations des cas plus compliqués encore lorsque les fils dérivants sont eux-mêmes reliés par d'autres conducteurs, ou lorsqu'il se trouve dans le circuit, et en des points différents, plusieurs sources électro-motrices. On peut arriver par des considérations théoriques à déterminer encore la marche complète du courant, mais nous allons nous borner à indiquer le cas le plus simple où l'on peut prévoir ce qui doit se passer par une simple analogie entre la propagation du courant et celle de l'eau dans un canal.



Soit P la pile, $P A$ et $P B$ deux conducteurs partant de la pile, $A C B$ et $A D B$ deux dérivations dont deux points, C et D , sont reliés par un fil conducteur. Le courant marchant dans la direction $P A$, dans les deux fils dérivants, il marche de A en B . Dans le fil $C D$ le sens du courant est déterminé par la position des points C et D . Il n'y a pas de courant si les deux points sont au milieu des deux conducteurs, car il n'y a pas de raison pour

que le courant marche plutôt dans un sens que dans l'autre. Il en est évidemment de même si les deux points sont placés tous les deux à la même distance du point A ; mais si l'un d'eux, C, par exemple, est plus près de A que D, c'est-à-dire si la distance A C est plus petite que la distance A D, le courant marchera de C en D ; le contraire aura lieu, si A D est plus petit que A C ; de même que si, dans un cours d'eau, il y a une bifurcation, et si on réunit deux points par un nouveau canal, il n'y aura pas de courant si les points sont au même niveau, et le courant aura des sens différents, suivant la position du point le plus élevé.

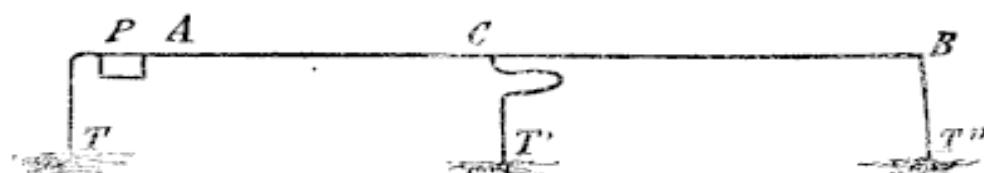
Dérivations sur les lignes électriques. — On a souvent à étudier l'effet des dérivations sur les lignes électriques ; elles sont de plusieurs natures différentes. En premier lieu lorsqu'une pile sert à transmettre simultanément dans plusieurs directions, il y a division du courant et par suite dérivation. Quand un fil communique avec la terre, il y a encore perte de courant ou dérivation. Enfin l'électricité passe du fil à la terre par l'intermédiaire des supports et des poteaux, qui n'isolent jamais complètement, surtout lorsqu'ils sont humides.

Quelle que soit la communication avec la terre, on peut toujours imaginer qu'elle est remplacée par un fil de même nature que celui de la ligne, et dont la longueur doit être déterminée de façon qu'elle offre la même résistance à l'électricité.

Les calculs relatifs à ces différents cas de dérivation sont les mêmes que ceux qui ont été indiqués plus haut ; seulement il faut observer que la terre, ainsi que nous le verrons plus loin, n'offre aucune résistance au passage de l'électricité.

On peut donc aisément chercher quelle est l'intensité du courant aux divers points du circuit. Nous allons nous borner à examiner quelques cas particuliers.

Considérons une ligne électrique A B, dont on met l'une des extrémités A en communication avec l'un des pôles de la



pile P. L'autre pôle, ainsi que l'extrémité B de la ligne, communiquent avec la terre.

Imaginons qu'au point C il y ait une dérivation du courant C T. Cette dérivation provient, soit d'un fil qui touche le fil A B et traîne sur le sol, soit du fil d'une autre ligne électrique qui fait parvenir le courant à une autre station, soit enfin d'une communication avec la terre, causée par le mauvais isolement de la ligne, comme il arrive souvent par les temps humides. Quoi qu'il en soit, on peut supposer que cette dérivation est remplacée par un fil C T'', de même nature que celui de la ligne A B, dont la longueur doit être calculée suivant la résistance de la dérivation, et qui communique en T'' avec la terre.

Désignons par a la longueur de tout le fil conducteur A B, par F la force électro-motrice de la pile, par r sa résistance.

S'il n'y avait pas de dérivation en C, l'intensité du courant serait

$$I = \frac{F}{r + a}$$

Et si la résistance r de la pile est très-petite par rapport à celle de la ligne ; si, par exemple, elle est de 8 ou 10 kilomètres,

l'indice que celle a de la ligne est de 3 à 400 kilomètres, on peut négliger r devant a , et l'indice pour l'intensité :

$$I = \frac{F}{a}$$

$$\text{ou } I = \frac{1}{a}$$

en supposant la force électro-motrice égale à l'unité.

Remarquons que dans la résistance a doit entrer celle de tous les conducteurs que traverse le courant. Ainsi, si la ligne A B a pour longueur 300 kilomètres, et si en B il se trouve un appareil dont la bobine ait 200 kilomètres de résistance, la valeur de a sera de 500 kilomètres.

Supposons maintenant qu'il y ait en C une dérivation et qu'elle offre la même résistance qu'une longueur d de fil de même diamètre et de même nature que celui de la ligne, et, de plus, que la distance A C, à laquelle se trouve la dérivation, soit égale à b . On a pour la résistance C B T', $a - b$. Le courant se divise donc au point B en deux parties, l'une passe par C T', et l'autre par C B, et les intensités sont inversement proportionnelles aux résistances de b d'une part, et $a - b$ de l'autre.

Les deux fils C T' et C B T' peuvent, comme nous l'avons vu, se remplacer par un seul dont la résistance serait

$$\frac{\frac{1}{a-b} + \frac{1}{d}}{\frac{1}{a-b} + \frac{1}{d}} \text{ ou } \frac{(a-b) d}{a-b+d}$$

En ajoutant donc la résistance b de A C et ne tenant pas compte de celle de la pile, on a pour la résistance totale du circuit R :

$$R = b + \frac{(a-b) d}{a-b+d}$$

$$\text{ou } R = \frac{b(a-b) + a \cdot d}{a-b+d}$$

et l'intensité du courant de A en C est :

$$I = \frac{1}{R} \text{ ou } I = \frac{a-b+d}{b(a-b) + a \cdot d}$$

au lieu de $\frac{1}{a}$ qu'elle est quand il n'y a pas de dérivation.

Il est aisément de voir qu'elle est augmentée comme on devait s'y attendre.

En C, le courant se divise en deux parties proportionnelles : $a \frac{1}{d}$ suivant la dérivation C T, et $\frac{1}{a-b}$ suivant la ligne C B, ce qui donne :

$$\text{Suivant C T : } I' = I \times \frac{\frac{1}{d}}{\frac{1}{d} + \frac{1}{a-b}} = I \times \frac{a-b}{a-b+d}$$

$$\text{ou } I' = \frac{a-b}{b(a-b) + a \cdot d}$$

et suivant C B :

$$I'' = I \times \frac{\frac{1}{a-b}}{\frac{1}{d} + \frac{1}{a-b}} = I \times \frac{d}{a-b+d}$$

$$\text{ou } I'' = \frac{d}{b(a-b) + a \cdot d}$$

Ainsi on connaît l'intensité du courant qui traverse l'appareil

à B; il est évident qu'elle est moindre que celle qu'aurait le courant s'il n'y avait pas de dérivation.

Comme exemple, supposons que la ligne ait 300 kilomètres de longueur, et qu'à l'extrémité B se trouve un appareil dont la bobine ait pour résistance 200 kilomètres, ce qui donne pour la valeur de a , 500 kilomètres.

L'intensité du courant est donc auprès de la pile comme à l'extrémité de la ligne, s'il n'y a pas de dérivation :

$$I = \frac{1}{500} \text{ ou } I = 0,0020$$

Si la dérivation se trouve en un point a , tel que $A \text{ } C = 200$ kilomètres, et qu'elle offre une résistance de 200 kilomètres, on a $b = 200$, et $d = 200$; en appliquant les formules précédentes, il vient : 1° pour l'intensité suivant A C :

$$I = \frac{5}{1600} \text{ ou } I = 0,0031$$

2° Suivant la dérivation C T' :

$$I' = \frac{3}{1600} \text{ ou } T' = 0,0018$$

Enfin l'intensité du courant qui arrive à l'extrémité de la ligne à B est :

$$I'' = \frac{2}{1600} \text{ ou } I'' = 0,0013$$

On voit que la marche du courant est notablement modifiée par la dérivation, puisque si un appareil se trouve en B, il est inversé par un courant représenté par 20 quand il n'y a pas de dérivation, et par 13 quand il y a en C une dérivation dans les

conditions précédentes. Or, il peut se faire que le premier courant soit suffisant pour faire marcher l'appareil, tandis que le second ne produise aucun effet. Ce fait explique clairement comment sur les lignes électriques les dérivation peuvent empêcher les transmissions.

On peut appliquer les formules précédentes à diverses positions de la dérivation C T, et chercher quelle est l'intensité du courant qui, dans chaque cas, arrive au récepteur B.

D'après la forme de la valeur de I' :

$$I' = \frac{d}{b(a-b) + ad}$$

il est aisé de voir que si la longueur de la ligne a et la résistance de la dérivation d restent les mêmes, et que si l'on fait varier la distance b de la dérivation à la pile P, la valeur de I' change, et que cette valeur est la plus petite possible lorsque le produit $b(a-b)$ est le plus grand, ce qui a lieu quand b est égal à la moitié de a . Ainsi donc, c'est dans le cas où la dérivation se trouve au milieu de la ligne qu'elle diminue le plus l'intensité du courant qui arrive à l'extrémité. Dans l'exemple précédent nous avons supposé que la ligne avait 300 kilomètres de longueur, et qu'en B se trouvait un appareil offrant 200 kilomètres de résistance, ce qui donnait $a = 500$ kilomètres; donc le courant arrivant en B a le moins d'intensité quand la distance A C est égale à 250 kilomètres.

Quand au contraire la dérivation se trouve près du point où se trouve la pile, alors b est très-petit, et le produit $b(a-b)$ peut être négligé devant le produit ad .

Ainsi, si $a = 500$ kilomètres, $d = 200$, et si la dérivation est seulement à un kilomètre de A, $b = 1$, on aura $ad = 100,000$ et $b(a-b) = 499$, nombre infiniment moindre et dont la suppression

sion ne diminue que dans une très-faible proportion le dénominateur.

Dans ce cas on peut donc poser

$$i'' = \frac{1}{a},$$

ce qui prouve que l'intensité du courant reçu en B est la même que lorsque la dérivation n'existe pas.

Ainsi, en résumé, une dérivation a très-peu d'influence sur le courant transmis lorsqu'elle existe près du point de départ du courant, et elle diminue d'autant plus son intensité, qu'elle se trouve plus éloignée du point de départ, jusqu'à ce qu'elle se trouve au milieu du conducteur, c'est-à-dire au point où la résistance est égale des deux côtés.

Ce qui précède explique comment il peut arriver qu'un poste reçoive bien de son correspondant, tandis que son courant ne peut faire marcher l'appareil de l'autre poste, et beaucoup d'autres faits qui se présentent sur les lignes électriques et sur les-quels nous n'avons pas à insister ici.

CONDUCTIBILITÉ DE LA TERRE.

On sait que, lorsqu'une pile est isolée, l'un des pôles est électrisé positivement et l'autre négativement.

Lorsque l'on fait communiquer avec la terre deux points d'un circuit, de façon à remplacer par le sol une partie du conducteur extérieur à la pile, le courant électrique a lieu bien que les couches qui forment l'enveloppe de la terre ne conduisent pas parfaitement l'électricité. On peut déterminer facilement la résistance qu'offre la terre au courant, en enlevant les deux communications avec le sol et en cherchant avec le rhéostat la lon-

gueur du fil qu'il faudrait substituer à la terre pour avoir le même courant.

De nombreuses expériences ont été faites pour déterminer cette résistance, en faisant varier les distances des plaques qui plongent dans le sol (les électrodes), et leur étendue. On a trouvé que la résistance augmente avec la distance des plaques, mais elle ne lui est pas proportionnelle. À partir d'une certaine distance, cette résistance peut être regardée comme constante, pourvu que les électrodes établissent une communication parfaite avec le sol. Cette résistance est extrêmement faible eu égard aux résistances qui sont en jeu dans la télégraphie électrique, on peut donc n'en pas tenir compte et regarder, comme nous l'avons fait jusqu'ici, la résistance de la terre comme nulle.

Cette résistance varie aussi avec la dimension des électrodes, mais sans lui être proportionnelle : à mesure que cette dimension augmente, la résistance tend vers une limite constante.

Il faut en outre tenir compte de la manière dont la communication est établie avec le sol. De l'eau enfermée dans une citerne maçonnée fournirait, si l'on y plongeait une lame métallique, une très-mauvaise communication avec la terre. Les conditions sont les mêmes que pour les paratonnerres. Nous nous bornerons à dire que pour avoir dans les postes télégraphiques une bonne communication, condition essentielle à toute transmission, il faut plonger une plaque métallique dans de l'eau courante, ou, à son défaut, dans de la terre humide, et dans ce cas il est bon d'augmenter ses dimensions et de l'entourer de braise de boulanger. Lorsqu'on peut attacher le fil à des tuyaux de gaz ou de conduite d'eau, il est bon de le faire, car on est certain que la communication avec le sol est parfaite.

Il suit de la parfaite conductibilité de la terre que dans les transmissions télégraphiques il y a tout avantage à supprimer le

fil de retour; car, outre l'économie qui en résulte, l'intensité du courant est double puisqu'on peut négliger celle de la terre. C'est en effet ce qu'on a pu constater sur les lignes électriques.

On peut concevoir le rôle de la terre de deux manières différentes dans ce phénomène. Elle peut être envisagée comme un conducteur ordinaire dont la section est infiniment grande, ce qui rend sa résistance très-faible, et alors le circuit se complète directement d'un pôle à l'autre; ou bien elle agit séparément aux deux extrémités du circuit en absorbant le fluide qui s'y porte, sans qu'il soit nécessaire de supposer que le mouvement ait lieu dans le sol d'un pôle à l'autre. La question se réduit à savoir si une pile électrique étant placée entre deux grandes masses de la dimension de la terre, on obtiendrait un courant en faisant communiquer l'une d'elles avec le pôle positif et l'autre avec le pôle négatif.

Quand une pile est isolée, les deux pôles sont chargés, l'un de fluide positif et l'autre de fluide négatif; si ces deux pôles sont mis en communication avec deux masses, elles se chargent également des deux électricités, qu'elles conservent à l'état statique. Le temps qu'elles emploient à se charger est ordinairement très-court; mais si elles ont de grandes dimensions, on comprend qu'il puisse être beaucoup plus long, et pendant tout le temps qu'a lieu la charge il y a courant électrique. Ainsi si l'on imagine deux grandes masses d'un volume analogue à celui de la terre, reliées aux deux pôles, il y aura production d'électricité, et par suite courant jusqu'à ce qu'elles se chargent suffisamment pour acquérir une tension égale à celle que la pile peut produire, ce qui pourra durer jusqu'à la combinaison complète des matières qui forment la pile.

On peut donc dire que si deux électrodes plongent dans la terre à une grande distance l'une de l'autre, les deux électricités se répandent séparément dans toute la masse de la terre; mais

Novembre 1859.

11

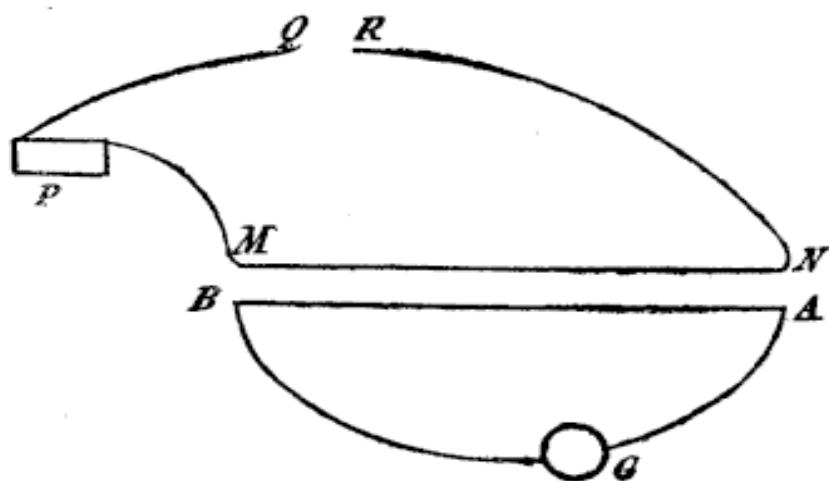
comme les deux fluides dégagés sont toujours en quantités égales, l'état de la terre reste sensiblement le même, et l'on peut admettre que la terre joue un double rôle : elle吸orbe l'électricité à mesure qu'elle se dégage aux deux pôles, et en même temps reconstitue le fluide neutre.

INDUCTION.

Nous passons à un autre ordre de phénomènes qui constituent ce qu'on nomme l'induction, et ont une grande analogie avec l'électrisation par influence dont nous avons parlé au commencement du cours ; ils en sont même une conséquence directe.

Induction. — Le principe fondamental consiste en ce que si deux circuits sont parallèles et voisins sur une certaine étendue, et si l'on fait passer dans l'un d'eux un courant, au moment où le courant s'établit, le second circuit est traversé par un courant de sens contraire. Si le courant cesse dans le premier conducteur, le second circuit est traversé par un courant de même sens.

Ainsi considérons les deux circuits $P Q R N M$ et $B A G$. Dans le premier se trouve une pile P , mais nous le supposerons interrompu en $Q R$. Le second circuit $A B G$ n'a pas de pile, mais en G



se trouve un galvanomètre. Ils sont parallèles sur une portion de leur parcours. Supposons qu'on fasse passer le courant dans le premier conducteur en joignant R et Q, et que le courant marche de M en N; si l'on observe le galvanomètre G, on voit immédiatement l'aiguille dévier et indiquer le passage d'un courant marchant, dans le deuxième conducteur, dans la direction A B G, en sens contraire du premier courant. Ce courant est instantané, c'est-à-dire qu'il dure un temps infiniment court, bien que le conducteur M N continue à être traversé par le courant de la pile. Au moment où l'on rompt le circuit en Q R, on voit encore le galvanomètre G dévier et indiquer le passage d'un nouveau courant induit également instantané et marchant de B en A; il est donc de sens contraire au premier courant induit, et de même sens que le courant de la pile qu'on nomme courant inducteur. Les deux circuits portent les mêmes noms que les courants; celui qui est traversé par le courant de la pile se nomme circuit inducteur, et l'autre circuit induit.

On observe encore des courants induits dans le conducteur A B. Quand, au lieu de fermer et d'ouvrir le circuit voisin en R et Q, on laisse passer le courant d'une manière permanente et qu'on approche ou qu'on éloigne M N de A B, le courant induit n'est plus instantané, il persiste tant que dure le mouvement. Il est de sens contraire au courant de la pile quand les deux circuits s'approchent l'un de l'autre, et de même sens toutes les fois qu'ils s'éloignent. Ces courants sont d'autant plus forts que le mouvement est plus rapide, de sorte que l'on peut dire que la masse d'électricité qui est mise en jeu quand un courant s'approche ou s'éloigne d'un conducteur fermé est toujours la même. Si le mouvement est rapide, l'intensité est considérable, mais la durée est courte, tandis que le contraire a lieu lorsque le mouvement est lent.

Des effets analogues ont lieu lorsque le courant M N reste à

une distance constante de A B, mais que par une cause quelconque il augmente ou diminue d'intensité. Dans le premier cas il se produit un courant induit de sens contraire au courant de la pile, et de même sens dans le second.

L'intensité des courants induits est proportionnelle à l'étendue des fils qui sont en présence, M N et A B dans les figures précédentes. Aussi, avec deux conducteurs électriques parallèles, on n'observe pas, en général, de ces courants, parce qu'il est difficile de leur donner des dimensions assez grandes. Pour étudier ces phénomènes on emploie des bobines de fil recouvert. L'une forme le circuit induit, ses deux extrémités communiquent avec le fil d'un galvanomètre ; l'autre constitue le circuit inducteur et peut pénétrer dans la première ; elle est reliée aux deux pôles de la pile, et un interrupteur permet d'établir ou de rompre à volonté le courant. On voit le galvanomètre dévier, comme nous venons de l'indiquer, toutes les fois qu'on ferme ou qu'on rompt le circuit de la bobine inductrice ou que, le courant étant établi, on l'éloigne ou on le rapproche de l'autre en l'enfonçant ou en la sortant de la bobine induite.

Induction par les aimants. — Nous avons dit qu'un aimant jouissait de toutes les propriétés des solénoïdes, ou, en d'autres termes, qu'il pouvait être considéré comme formé par une infinité de petits courants parallèles de même sens et situés dans des plans perpendiculaires à la ligne des pôles. On peut donc prévoir que si l'on introduit un aimant dans une bobine de fil recouvert dont les deux extrémités sont reliées par le conducteur d'un galvanomètre, il y aura un courant induit toutes les fois que l'aimant s'approchera ou s'éloignera de la bobine, comme dans le cas précédent, où l'on faisait pénétrer dans la bobine induite une seconde bobine traversée par le courant. Les courants induits changent de sens suivant que l'aimant s'approche ou qu'il s'éloigne de la bobine ; ils durent tant qu'a lieu le mou-

vement et sont d'autant plus intenses que ce mouvement est plus rapide.

Si dans l'intérieur de la bobine il se trouve un barreau de fer doux, et si l'on approche de ce barreau un aimant, le courant induit sera beaucoup augmenté, car à l'effet du rapprochement de l'aimant sur le circuit induit vient s'ajouter celui de l'aimantation du fer doux qui agit de la même manière.

Les courants induits sont instantanés dans le cas où ils proviennent de l'ouverture ou de la fermeture d'un circuit, et peuvent avoir une durée plus ou moins longue quand ils sont produits par le rapprochement d'un courant continu ; dans les deux cas, la masse totale d'électricité mise en mouvement est la même. On comprend donc que dans le premier la durée étant plus courte, la tension électrique doit être plus considérable. C'est en effet ce qui arrive : aussi les courants d'induction jouissent-ils de propriétés analogues à celles de l'électricité statique. Ainsi quand on interrompt le circuit en coupant le fil, on peut obtenir une étincelle même à des distances assez considérables, 3, 4 centimètres et même davantage, tandis que pour les courants voltaïques ordinaires l'étincelle n'éclate qu'au contact.

Machines magnéto-électriques. — On peut obtenir, comme nous venons de le voir, des courants électriques sans le secours d'aucune pile. L'appareil se compose toujours d'un aimant, d'un barreau de fer doux en fer à cheval et d'une bobine entourant le barreau. En rapprochant et éloignant alternativement l'aimant et le fer doux, on obtient des courants qui ont des sens différents suivant qu'il y a rapprochement ou éloignement.

On donne différentes formes aux machines électro-magnétiques. Dans la machine de Clark, une des plus connues, l'aimant est fixé verticalement sur une planchette. Un électro-

aimant formé de deux cylindres de fer doux entourés de fil recouvert de soie et reliés par une traverse également en fer doux est mobile autour d'un axe horizontal qui passe au milieu de la traverse, de telle sorte que les deux branches de l'électro-aimant se trouvent appliquées contre les pôles de l'aimant. Quand on tourne, au moyen d'une manivelle, l'électro-aimant, ses deux extrémités se trouvent simultanément tantôt entre les deux branches de l'aimant fixe, et tantôt contre ces branches elles-mêmes. Dans le premier cas, l'électro-aimant est à l'état neutre, et dans le second cas il est aimanté par influence ; en passant d'une position à l'autre, il se développe donc dans le fil des courants d'induction dont le sens varie à chaque demi-révolution. Si l'on suit, en effet, un des bras de l'électro-aimant à partir du moment où il se trouve sur une branche de l'aimant fixe, on voit que dans le premier quart de la révolution il s'éloigne de l'aimant et se désaimante ; il se développe alors un courant d'un certain sens dans le fil : en s'approchant de l'autre branche de l'aimant fixe il s'aimante en sens contraire, et la direction du courant induit dans le fil reste la même que dans la première partie du mouvement ; en dépassant cette position l'électro-aimant se désaimante de nouveau et la direction du courant change, jusqu'au moment où l'électro-aimant se trouve de nouveau dans sa première position après avoir accompli une révolution.

On obtient ainsi une série de courants changeant continuellement de sens et qui jouissent de toutes les propriétés des autres courants. Lorsqu'on tient à la main deux poignées communiquant avec le fil de la bobine, on ressent des commotions qui sont d'autant plus fortes que la vitesse de rotation est plus grande.

On dispose ordinairement la machine pour que dans le conducteur extérieur le courant conserve toujours la même direction. A cet effet, les deux fils qui entourent l'électro-aimant aboutissent

à deux ressorts qui appuient sur l'axe de rotation ; cet axe porte lui-même des communications métalliques qui aboutissent à deux bornes auxquelles s'attache les extrémités du fil extérieur, de façon à former une sorte de commutateur. Pendant une demi-révolution chacun des ressorts reste en communication avec les deux mêmes bornes, et au moment où l'électro-aimant passe devant l'aimant, les communications sont interverties ; il en résulte que la direction du courant, changeant autour de la bobine, reste la même entre les deux bornes métalliques dans le fil extérieur.

Au lieu de faire mouvoir l'électro-aimant devant le fer doux, on peut laisser l'électro-aimant fixe, et faire tourner un barreau de fer doux devant les deux extrémités de l'électro-aimant. Le résultat est évidemment le même.

Enfin on préfère quelquefois placer le fil recouvert autour de l'aimant lui-même et faire mouvoir en face une plaque de fer doux. Il en résulte, au moment où la plaque passe devant les extrémités de l'aimant, un changement de position dans les pôles qui produit une véritable désaimantation et donne lieu à des courants induits, aussi bien que l'aimantation et la désaimantation du fer doux.

Les courants d'induction peuvent être employés pour la télégraphie ; divers essais ont été faits dans ce but, notamment sur la ligne de Paris à Lille. Mais il faut remarquer que ces courants n'ont qu'une durée déterminée et constante pour une vitesse de rotation donnée, ils ne peuvent donc convenir à tous les systèmes ; ainsi pour les appareils Morse, où l'on a besoin de produire des courants d'une durée variable pour obtenir des traits et des points, leur usage ne peut être adopté, au moins dans les conditions ordinaires.

Il n'en est pas de même pour les appareils à cadran, où chaque

émission du courant produisant une aimantation de l'électro-aimant, donne lieu à un mouvement de la palette et fait avancer une aiguille d'une division.

Machines électro-magnétiques à courant continu. — Lorsqu'on tourne avec une très-grande vitesse la manivelle d'une machine de Clark, disposée de façon que les courants conservent la même direction dans le conducteur extérieur, la succession peut être tellement rapide qu'il n'y ait plus d'interruption sensible, et l'on obtient alors une sorte de courant continu. On a construit dans ces derniers temps, sur ce principe, une machine électro-magnétique très-puissante qui est mise en mouvement par une machine à vapeur. Elle comprend un grand nombre d'aimants et d'électro aimants, et tous les effets s'ajoutant, on obtient dans le conducteur extérieur un courant d'une très-grande énergie.

Ces courants pourraient être à la rigueur employés en télégraphie et remplacer nos piles, mais il y aurait peu d'avantage vu la faible intensité nécessaire pour faire marcher les appareils. Ils peuvent avec beaucoup plus de raison être employés dans certaines industries telles que la galvanoplastie. L'éclairage électrique peut également bien réussir avec ces courants, et il est probable qu'un jour on en pourra tirer un bon parti.

Courants d'induction produits par les courants volatiques ordinaires. — Voici un autre moyen d'obtenir des courants d'induction qui nécessite il est vrai l'emploi d'une pile, mais qui permet de transformer avec la plus grande facilité en courant induit, jouissant de propriétés particulières, un courant ordinaire.

On obtient ce résultat au moyen d'un cylindre de fer doux autour duquel sont enroulées deux bobines de fil recouvert. On fait passer dans l'une d'elles le courant de la pile, et l'autre est aussitôt parcouru par un courant induit de sens contraire. Si un

long fil métallique, ou le fil d'une ligne électrique sont en communication avec la bobine induite, ils sont parcourus par ce courant, pourvu que le circuit puisse se compléter soit par le fil lui-même, soit par la terre.

Le courant induit est d'autant plus fort que l'aimantation du fer doux a été plus grande ; or nous avons vu déjà les conditions que doit remplir le fil pour produire la plus forte aimantation possible. S'il n'y a pas de grande résistance extérieure à la bobine, elle doit être formée de gros fil et faire un petit nombre de tours. C'est le cas qui se présente ici, puisque la résistance extérieure est seulement celle de la pile. D'un autre côté, l'action sur le circuit induit est proportionnelle à l'étendue de ce circuit, ou plutôt au nombre de tours qui environnent l'électro-aimant. Donc, en résumé, la bobine inductrice doit être formée de gros fil et avoir peu de tours, tandis que la bobine induite, au contraire, doit être formée de fil fin enroulé un grand nombre de fois autour du fer doux.

Dans quelques pays on emploie un appareil semblable pour transmettre les signaux télégraphiques. Le manipulateur est un levier semblable à celui de l'appareil Morse qui ferme le circuit de la pile locale par l'intermédiaire du fil inducteur ; le fil induit est en communication avec la terre d'une part et de l'autre avec la ligne. Au moment de la fermeture du premier circuit, il se développe un courant induit qui se rend à l'extrémité de la ligne dans l'appareil récepteur ; ce courant ne dure qu'un instant très-court. Quand on lève le levier, on rompt le circuit inducteur, et un second courant de sens contraire au premier parcourt de nouveau la ligne. Pour appliquer ce genre d'appareil au système Morse, dont l'alphabet comprend des traits et des points, il faut apporter au relais une modification qui consiste principalement à remplacer l'armature mobile en fer doux par une armature aimantée. Elle est attirée au passage du premier courant et reste

dans cette position jusqu'à ce qu'un second courant vienne aîmanter en sens contraire l'électro-aimant et produire une répulsion.

Propriétés des courants d'induction. — Les courants d'induction, sans différer essentiellement des courants ordinaires, ont pourtant certaines propriétés particulières ; ils ont une grande analogie avec les décharges instantanées qu'on obtient quand on met le conducteur électrisé d'une machine électrique en communication avec la terre, ou quand on réunit les deux armatures d'une bouteille de Leyde. Ainsi on obtient des étincelles en interrompant le circuit et en le complétant par deux pointes placées à une certaine distance l'une de l'autre. Les étincelles peuvent avoir 2 à 3 centimètres de longueur et même davantage, suivant la force de la pile inductrice et la forme de l'appareil, tandis qu'avec les courants ordinaires, c'est au contact seulement qu'on peut obtenir des étincelles. Les courants d'induction s'isolent difficilement, et beaucoup de substances, telles que le bois, l'ivoire, etc., qui ne conduisent pas l'électricité pour les courants voltaïques, sont de bons conducteurs pour les courants induits. Ainsi donc sur une ligne électrique, quand on emploie des courants induits, une partie du fluide doit se perdre par les supports ; mais le fer étant incomparablement meilleur conducteur, il en passe suffisamment pour envoyer des courants électriques, même à de grandes distances. Enfin les courants induits produisent des commotions très-violentes sur les êtres animés ; il peut même dans certains cas arriver des accidents si l'on ne prend des précautions quand on fait usage de puissantes machines d'induction et que les courants se succèdent à des intervalles très-rapprochés.

En résumé, on peut dire que l'induction est en quelque sorte la transformation de l'électricité à faible tension qui constitue les courants ordinaires, en électricité à une haute tension et jouissant

de toutes les propriétés signalées dans l'étude de l'électricité statique.

Machine d'induction de Ruhmkorff. — Les courants induits s'isolant beaucoup plus difficilement que les courants ordinaires, lorsqu'on les produit avec des bobines ordinaires de fil recouvert de coton ou de soie entourant un électro-aimant, la plus grande partie du fluide électrique se perd.

M. Ruhmkorff a eu l'idée d'isoler beaucoup plus complètement le fil qu'on ne l'avait fait jusqu'alors, en séparant avec soin les spires du fil, en l'enduisant d'essence de térébenthine, et il est arrivé à construire une machine qui produit des effets surpris- nants.

Quant à la fermeture du circuit inducteur, au lieu de le produire à la main ou au moyen d'une machine spéciale, on a utilisé le courant inducteur lui-même par une disposition ana- logue à celle de nos appareils trembleurs. Le pôle de la pile com- munique avec un petit levier terminé par une plaque de fer doux qui à l'état de repos appuie sur un support métallique auquel est attachée l'une des extrémités du fil inducteur, l'autre extré- mité aboutissant à l'autre pôle de la pile. Le circuit se trouve donc fermé, et la petite plaque est attirée ; en se séparant du support métallique sur lequel elle reposait, elle rompt la commu- nication et le fer doux se désaimante ; la plaque revient par son poids ou en vertu d'un ressort à sa position première. On a ainsi une série de contacts intermittents qui produisent autant de courants induits.

Quant au noyau de la bobine, il est formé d'une série de pe- tites tiges en fer doux très-pur.

On obtient avec cet appareil des étincelles qui ont jusqu'à 1 décimètre de longueur. Leur succession rapide permet d'étu-

dier une foule de phénomènes électriques qu'on observait difficilement avec les machines et les bouteilles de Leyde, qui exigeaient un temps considérable pour se charger ; la machine de Ruhmkorff présente en quelque sorte une machine électrique ordinaire constamment électrisée.

Cet appareil est destiné en outre à jouer un rôle important dans quelques applications de l'électricité, et particulièrement dans l'emploi qu'on peut en faire pour faire partir les mines. Il suffit en effet d'une machine de Ruhmkorff, de quelques éléments Bunsen et d'une longueur de fil recouvert de gutta-percha suffisante, pour faire partir une mine à une distance considérable de l'expérimentateur.

Induction d'un courant sur lui-même. — Quand un courant parcourt un circuit et que certaines parties se trouvent rapprochées les unes des autres, on peut constater des phénomènes d'induction dont la cause est analogue à celle des courants induits dont nous avons parlé plus haut. Leur observation est souvent difficile parce que ces courants se confondent avec le courant principal, et il faut des dispositions spéciales pour les observer. Cette induction est beaucoup augmentée quand un électro-aimant se trouve dans le circuit, puisque son aimantation ou sa désaimantation s'ajoute à l'effet du courant principal.

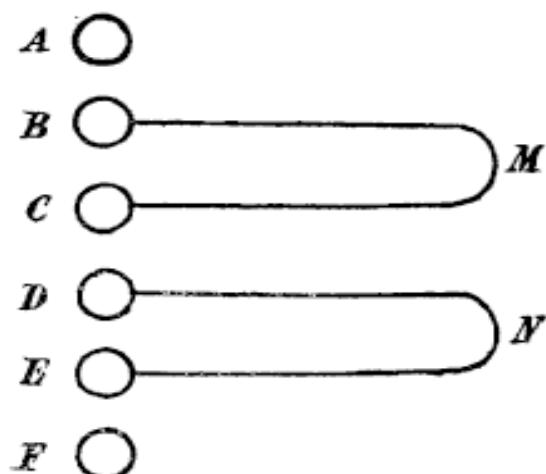
Lors donc qu'un fil, dont une partie est enroulée en hélice, est parcouru par un courant, on peut admettre qu'au moment où le courant s'établit, il s'en développe un second de sens contraire qui diminue pendant un moment très-court l'intensité du premier, et au moment où l'on rompt le circuit il s'en développe un second de même sens. Ce second courant ne peut s'observer que si l'on complète immédiatement le circuit par un autre fil. Ce fait se présente souvent dans les bureaux télégraphiques : après avoir envoyé le courant de la pile au poste

correspondant, si l'on revient subitement à la position de réception en plaçant le galvanomètre dans le circuit, on observe un petit courant dont la direction est la même que celle du premier, et qui n'est autre que le courant induit. Il ne faut pas confondre ce courant avec le courant de retour dont nous parlerons plus loin, qui se produit sur les longues lignes et surtout sur les lignes sous-marines, et dont la direction est précisément contraire.

VITESSE ET PROPAGATION DE L'ÉLECTRICITÉ.

C'est à M. Wheatstone qu'oa doit les premières études sur la vitesse de propagation de l'électricité. Ses expériences furent faites au moyen de la bouteille de Leyde.

Concevons six boules métalliques, disposées comme l'indique la figure ci-dessous, c'est-à-dire les boules B et C réunies par un long fil métallique, et les boules D et E également réunies par un fil.



Si l'on met les boules A et F en communication avec les deux armatures d'une bouteille de Leyde, le fluide passera de la boule A à la boule B en produisant une étincelle ; il suivra le fil conducteur B M C ; une nouvelle étincelle partira entre C et D ; le fluide passera dans le conducteur D N E, et enfin une troisième étincelle éclatera entre E et F.

Si ces trois étincelles éclatent en même temps, et si les conducteurs B M C et D N E sont suffisamment longs, on doit en conclure que le fluide électrique se transporte instantanément d'une extrémité du conducteur à l'autre; si, au contraire, il y a un retard dans les étincelles, si elle apparaît d'abord entre A et B, puis entre C et D, et enfin entre E et F, on en conclura que le fluide ne se transmet pas instantanément, et le retard des étincelles permettre de déterminer la vitesse du fluide.

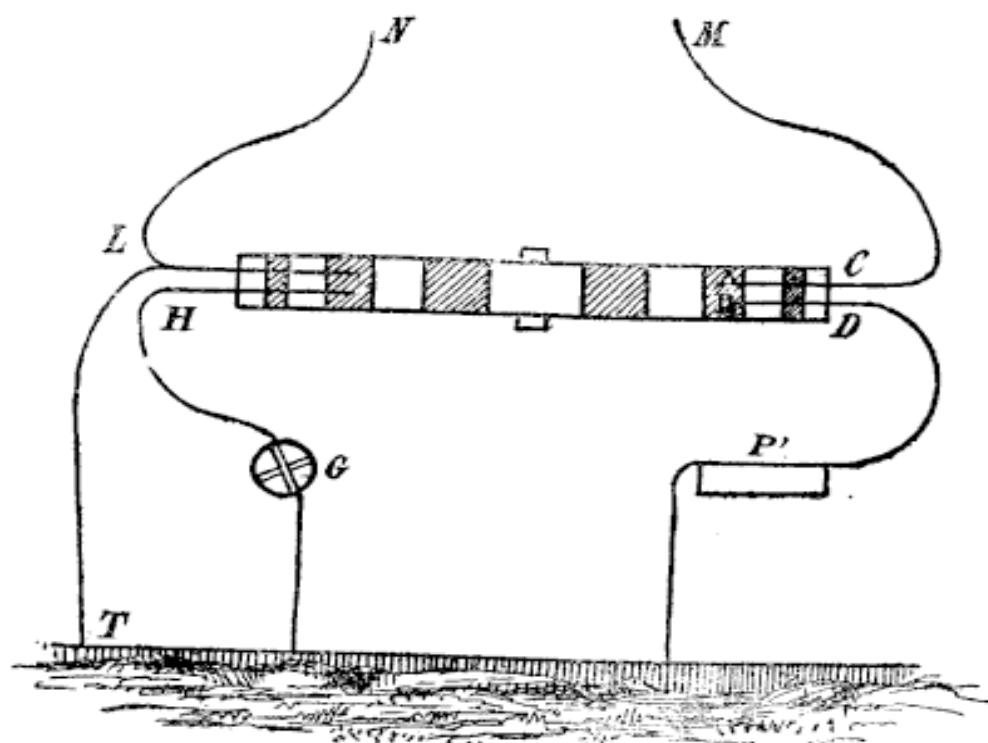
On est parvenu à apprécier le temps infiniment court qui sépare les décharges électriques entre les différentes boules au moyen d'un miroir tournant autour d'un axe légèrement incliné sur son plan. En regardant dans le miroir, pendant qu'il tourne, l'image d'un point lumineux, on le voit décrire un arc de cercle et l'axe semble tourner.

Les boules étant placées sur cet axe, on regarde par réflexion les étincelles au moment de la décharge. Si elles éclatent en même temps, on doit apercevoir une ligne droite lumineuse correspondant à une position unique de l'axe. Si, au contraire, il y a un retard et que l'étincelle éclate d'abord entre les deux boules les plus voisines du miroir, puis entre celles du milieu, puis enfin entre les deux dernières, l'image sur le miroir doit représenter une ligne oblique par rapport au rayon, et d'après l'angle que forme cette ligne avec l'image de l'axe et la vitesse de rotation connue du miroir, on a facilement le retard des étincelles. On a reconnu par cette méthode qu'il se produit d'abord deux étincelles simultanément entre les boules A et B, et entre E et F, et plus tard il en éclate une entre les boules du milieu C et D, ce qui montre que l'électricité part en même temps des deux armatures de la bouteille de Leyde. Si l'on met l'une des armatures en communication avec la terre en même temps que l'une des boules extrêmes, F, par exemple, on voit que l'étincelle part d'abord entre les deux

premières boules A et B, puis entre les deux suivantes C et D, et en dernier lieu entre les deux dernières. Le fluide part donc, dans ce cas, de l'armature en communication avec la boule pour se rendre directement dans le réservoir commun.

Cette méthode ne peut s'appliquer qu'à des décharges électriques. On a trouvé que la vitesse de propagation pouvait être évaluée à 400,000 lieues par seconde. Depuis, d'autres expériences ont été faites en employant des courants voltaïques ordinaires ; elles ont donné des résultats bien différents. Voici comment ont été faites les premières, par MM. Gounelle et Piseau.

Leur appareil se compose d'une petite roue interruptrice en bois portant sur sa circonference des lames de platine dont la largeur est égale à celle des parties isolantes. Deux ressorts pareils, A C et B D, appuient sur la roue de façon à toucher la même lame. Si la roue tourne, les ressorts ne sont en com-



munication qu'au moment où ils pressent sur une partie métallique. Deux autres ressorts, disposés comme les premiers, reposent sur une autre partie de la circonference. Ces quatre ressorts passent en même temps d'une division à une autre de la roue.

Le ressort B D est en communication avec l'un des pôles de la pile P, dont l'autre correspond à la terre ; le ressort A C est relié au conducteur M N dans lequel on veut mesurer la vitesse de l'électricité, l'extrémité opposée venant aboutir au ressort L ; quant au quatrième ressort, H, il est en communication avec la terre par l'intermédiaire d'un galvanomètre G.

Si, d'après la position de la roue, les quatre ressorts se trouvent sur des lames de platine, le courant partant de la pile passe par les ressorts B O et A C dans le conducteur C M N H, et revient par l'intermédiaire des ressorts L et H dans le galvanomètre G, et enfin par la terre à l'autre pôle de la pile. Nous supposons que la ligne L T n'existe pas pour le moment.

Quand la roue tourne, les quatre ressorts se trouvent ensemble sur des portions isolantes, et le courant est interrompu en même temps que la communication du conducteur avec le galvanomètre. Le courant passe donc sur la ligne pendant tout le temps que les ressorts emploient à passer sur une lame de platine.

Supposons que ce temps soit précisément égal à celui qu'il faut à l'électricité pour parcourir le conducteur ; le fluide arrivera au ressort L au moment où ce ressort passera, en même temps que le ressort H, sur une lame isolante, et le courant ne pourra traverser le galvanomètre.

Ainsi donc, en tournant la roue d'abord lentement, puis en augmentant la vitesse de rotation, il semble qu'il doive arriver

un moment où, en observant le galvanomètre G, on n'observe aucune déviation, et qu'en calculant le temps qu'emploient les ressorts à passer d'une division à l'autre, on doive obtenir celui que met l'électricité à parcourir le conducteur.

Il n'en est pas rigoureusement ainsi, parce que le fil reste chargé d'électricité quand les ressorts passent sur une lame isolante, et que ce fluide passe dans le galvanomètre au contact suivant avec les lames métalliques.

C'est pour opérer la décharge du fil que l'on ajoute un fil de dérivation L T. Il doit avoir une assez grande résistance pour que, quand la roue est au repos et que les ressorts appuient sur des lames de platine, le courant se divise en L en deux parties et qu'une portion notable passe par le galvanomètre.

On tourne donc la roue et l'on suit l'aiguille du galvanomètre dont la déviation va en diminuant à mesure que la vitesse augmente ; le moment où cette déviation cesse de décroître fait connaître le temps que l'électricité emploie à parcourir le conducteur.

Si la rotation, à partir de ce moment, devient encore plus rapide, la déviation augmente et atteint un maximum qui a lieu lorsque l'électricité qui part du ressort H arrive en C, au moment où les ressorts passent de nouveau sur une lame conductrice.

On a trouvé ainsi que la vitesse d'électricité est : dans le fer, de 100,000 lieues par seconde, et dans le cuivre de 180,000 lieues.

D'autres expériences faites depuis ont donné des nombres très-différents, et ces différences résultent de ce que les lignes essayées n'étaient pas toutes dans les mêmes conditions. Nous

Décembre 1859.

62

allons voir, en effet, que les corps conducteurs qui se trouvent dans le voisinage d'un fil métallique peuvent diminuer notablement cette vitesse ; mais, en outre, même pour des lignes isolées de la même manière, le nombre qu'on doit trouver pour la vitesse varie avec la longueur du fil sur lequel on fait l'expérience.

En effet, le fluide électrique ne se transmet pas, à la manière du son, au moyen d'ondulations qui, dans le même temps, parcourent un espace déterminé, ou à la manière d'un corps solide qui traverse l'espace avec un mouvement uniforme.

Si l'on veut bien se rendre compte de tous les phénomènes qui se produisent, il faut plutôt l'assimiler à un gaz qui se répand dans un tuyau vide. Le gaz commence à s'étendre dans le tuyau, il arrive presque immédiatement à l'extrémité, mais en petite quantité, puis peu à peu la pression s'accroît, le tuyau s'emplit, et enfin l'écoulement devient uniforme.

Pour la propagation de l'électricité dans un fil, il en est ainsi : le fluide arrive instantanément à l'extrémité, mais il ne produit pas d'abord d'action sur les appareils ou les galvanomètres, parce que la quantité qui passe est insensible. Peu à peu la tension augmente, le fil se charge, et au bout d'un instant appréciable, le courant s'établit d'une manière uniforme et persiste tant que le contact avec la pile dure à l'autre extrémité.

C'est donc seulement lorsque l'écoulement ou plutôt le courant a acquis une certaine intensité, que les appareils ou les galvanomètres accusent son passage, et il faut pour arriver à ce moment, que le fil se soit d'abord chargé. Or, on démontre par le calcul que le temps qu'il faut pour arriver à cet instant n'est pas proportionnel à la longueur du fil, mais bien au carré de cette longueur.

Ainsi, si la longueur du fil est a , et si le courant apparaît à l'extrémité du fil au bout d'un temps t , le temps qu'il faudra pour obtenir le même courant avec la même pile au bout d'un fil de longueur double, $2a$, sera $4t$. Ce même temps, pour un fil de longueur $3a$, sera $9t$, et ainsi de suite. On voit donc que si l'on divise la longueur de la ligne par le temps, comme on le fait ordinairement pour avoir la vitesse de l'électricité, on aura pour le premier fil $\frac{a}{t}$, pour le second $\frac{2a}{4t}$ ou $\frac{1}{2} \times \frac{a}{t}$, pour le troisième $\frac{1}{3} \times \frac{a}{t}$ et ainsi de suite.

On trouve donc un nombre d'autant plus petit que la longueur de la ligne sur laquelle on fait l'expérience est plus grande.

Lorsque le contact avec la pile cesse, le fluide continue à s'écouler à l'extrémité, mais le courant diminue de plus en plus jusqu'à devenir nul. On voit que l'électricité se comporte encore ici, comme un gaz dans un tuyau, qui, s'il n'est plus en communication avec la source, s'étend encore dans le tuyau, puis s'échappe peu à peu jusqu'à ce que le tuyau soit tout à fait vide.

On prouve facilement par l'expérience la réalité de ces faits. Si, en effet, on place à l'extrémité d'une ligne un appareil électro-chimique, formé d'une bande de papier préparé au cyanure de potassium, se déroulant d'un mouvement uniforme, et d'une pointe de fer mise en communication avec le fil de la ligne et appuyant sur le papier dont l'autre côté communique avec la terre, on voit une trace bleue sur le papier chaque fois qu'il est traversé par le courant. Or, si la ligne est assez longue, on voit cette trace, d'abord faible, augmenter peu à peu, et enfin conserver son intensité; puis si le courant est interrompu, cette trace s'affaiblit graduellement jusqu'à ce qu'elle disparaisse.

Cette expérience réussit surtout bien avec les lignes souterraines et sous-marines.

Le courant de retour est une conséquence de cette propagation de l'électricité. En effet si, après avoir mis le fil en communication avec la pile, on le fait subitement communiquer avec la terre, il est clair que le fluide dont le fil est chargé doit s'étendre des deux côtés et qu'une portion doit revenir au point de départ. Si un galvanomètre ou un récepteur se trouvent sur le parcours, ils doivent indiquer la trace d'un courant venant du fil.

Cet effet qui se produit tous les jours dans nos postes, est une nouvelle preuve que la propagation de l'électricité ne peut être assimilée à celle du son ou à celle d'un corps lancé dans l'espace.

Dans les lignes sous-marines, la vitesse de propagation est beaucoup plus faible que dans les lignes aériennes ; ce retard est dû à la condensation de l'électricité contre les parois du fil conducteur.

On sait, en effet, que le fil de cuivre qui est destiné à la transmission est entouré de gutta-percha, et, en outre, enveloppé de fils de fer destinés à le préserver au fond de la mer contre les agitations de l'eau. L'ensemble du fil et de son enveloppe forme donc une sorte de bouteille de Leyde, dont le conducteur est l'armature intérieure, le fil préservateur l'armature extérieure ; enfin la gutta-percha remplace le verre des bouteilles de Leyde ordinaires. Si donc on met le fil en communication avec le pôle positif de la pile, le fil de cuivre se charge d'électricité positive, et l'enveloppe extérieure, par influence, d'électricité négative qui neutralise une partie du fluide positif du conducteur, ainsi que nous l'avons expliqué à propos des bouteilles de Leyde. La charge totale du fil est donc beaucoup plus

grande que lorsque le fil est suspendu dans l'air. Or, puisque le courant ne peut s'établir régulièrement que lorsque cette charge est complète, il est clair que le temps nécessaire pour obtenir, à l'extrémité, la production d'un signe est beaucoup plus grand que dans le cas ordinaire. Plus l'influence de l'enveloppe est grande, et plus la charge du fil est considérable, par conséquent moins est grande la vitesse de propagation. Comme l'influence de l'enveloppe diminue avec son éloignement, on est conduit à penser que, pour obtenir une transmission plus rapide, il faut augmenter l'épaisseur de la couche de gutta-percha.

On ne peut, comme pour les fils aériens, assigner un chiffre exact pour la vitesse, puisque cette vitesse dépend de la longueur de la ligne. Le temps employé par l'électricité pour charger le fil et arriver à un écoulement perceptible étant proportionnel au carré de la longueur.

Ainsi, pour la vitesse, on a trouvé dans des expériences faites entre Londres et Bruxelles, au moyen des fils sous-marins, une vitesse de 4,300 mètres par seconde. Sur d'autres lignes souterraines et sous-marines, on a trouvé des nombres très-différents, ce qui s'explique très-naturellement comme nous l'avons dit plus haut.

COURANTS THERMO-ÉLECTRIQUES.

Nous dirons seulement quelques mots sur les courants thermo-électriques, qui n'ont en télégraphie qu'une importance très-secondaire, mais peuvent pourtant permettre d'expliquer quelquefois certains courants d'une intensité très-faible qui parcourent les fils télégraphiques.

Lorsque les deux points d'un fil sont à des températures dif-

férentes, il se produit un courant d'électricité positive qui marche de la partie chaude à la partie froide et dépend de la différence des températures. Si l'on imagine un circuit complet formé d'un seul fil et chauffé inégalement en divers points, il n'en résulte aucun mouvement électrique, parce que les courants ont lieu en sens contraire et sont égaux; mais si le circuit est formé de deux métaux, cuivre et bismuth, par exemple, et si l'on chauffe l'une des soudures en refroidissant l'autre, les courants sont inégaux dans les deux fils, à cause de l'inégalité de propagation du calorique, et l'effet définitif est un courant qu'on peut observer au moyen du galvanomètre. Lorsque les deux corps sont le cuivre et le bismuth, le courant marche de la soudure chaude à la soudure froide dans le cuivre.

On comprend que, pour les fils télégraphiques, une très-grande différence de température entre les points extrêmes puisse occasionner un petit courant; mais comme la résistance du conducteur est toujours très-considérable, ces courants doivent être à peine sensibles.

Depuis quelque temps l'électricité s'est enrichie de quelques faits nouveaux, qui ont même donné lieu à des théories dont la plus importante est celle du dia-magnétisme; mais comme elles sont complètement étrangères à la télégraphie électrique, nous les passerons sous silence cette année.

FIN.

