

ture, il rentre bientôt dans la loi générale, comme M. Dufour l'a reconnu plus tard lui-même, et que le degré de température à laquelle le barreau a été aimanté n'influe plus sur le sens de la variation de l'intensité magnétique. Ce qui, par contre, demeure vrai d'une manière absolue, c'est le fait constaté par M. Dufour, que les variations du magnétisme d'un barreau aimanté à une température plus élevée que celles auxquelles on l'a aimanté, sont plus faibles qu'elles ne seraient si l'aimantation avait eu lieu à une température plus basse. Il y a plus; les oscillations thermométriques font promptement acquérir au barreau une insensibilité à peu près complète à de faibles variations de température. Sur ce point, M. Wiedemann ne va pas tout à fait aussi loin que M. Dufour, bien qu'il ait trouvé aussi que des barreaux aimantés, à 100° chauffés et refroidis à plusieurs reprises, ne gardaient, sous le rapport de l'influence de la température sur leur magnétisme, qu'une sensibilité bien moindre que les barreaux aimantés à 0° exposés aux mêmes variations de température. Ce dernier fait est d'une importance bien grande dans le choix des aiguilles dont on doit se servir pour les observations de magnétisme terrestre, dans lesquelles on cherche l'état le plus convenable pour diminuer les corrections et les erreurs dues à la température. Voici, à cet égard, les règles à suivre que recommande M. Dufour :

1° Aimanter à une température *supérieure* à celles dans lesquelles les observations seront faites.

2° Faire varier la température de l'aiguille un grand nombre de fois (de 20 à 30), entre la température d'aimantation et la température minimum à laquelle on pourra être exposé.

3° Chercher la correction propre à l'aiguille, *seulement après* lui avoir fait subir les opérations indiquées; correction qui se déterminera, du reste, comme on le jugera convenable, soit en cherchant le vrai coefficient de variation pour 1 degré de température, soit en déterminant une ou plusieurs constantes empiriques, suivant le genre d'observations qu'on veut entreprendre.

§ 4. Théorie de l'induction électro-dynamique de M. Felici¹.

Dans le chapitre que nous avons consacré à l'induction électro-dynamique, nous avons dit quelques mots des théories proposées par plusieurs physiciens pour l'explication des faits qui s'y rattachent, et en particulier de celles de Weber et de Neumann. Ces théories ont peut-être l'inconvénient de s'appuyer moins sur les faits de l'induction elle-même que sur ses rapports évidents, il est vrai, avec les actions électro-dynamiques; elles sont jusqu'à un certain point l'expression mathématique de la loi de Lenz; en outre, elles n'embrassent que les phénomènes de l'induction produite par le mouvement sans les rattacher à ceux de l'induction par l'ouverture et la fermeture des circuits. M. Felici a fait de l'induction électro-dynamique l'objet de ses nombreuses et intéressantes recherches; il s'est appliqué à rassembler le plus grand nombre possible de faits pouvant donner naissance à une théorie mathématique de l'induction qui se déduisit ainsi de l'expérience seule. La méthode qu'il a suivie est celle qu'Ampère a appliquée à la théorie des actions électro-dynamiques, et l'ensemble de ses recherches, dont nous ne pouvons donner ici qu'un résumé succinct, est destiné, nous le pensons, à jeter du jour sur cette partie encore si peu connue et si peu expliquée de l'électricité dynamique.

M. Felici a commencé par étudier les lois des courants induits produits par l'ouverture et la fermeture d'un circuit voisin. L'appareil dont il a fait usage est un cylindre de bois autour duquel on enroule un fil de cuivre isolé formant un cercle complet, et dont les deux bouts tordus ensemble communiquent avec un galvanomètre: c'est le *circuit induit*. A droite et à gauche, à des distances égales, sont disposés des conducteurs semblables formés par le fil qui joint les pôles d'une pile; ce sont les circuits *inducteurs* dans lesquels on in-

¹ Ann. de ch. et de phys., t. XXXIV, p. 64.

troduit un rhéotome. En général, la méthode de M. Felici consiste à faire agir simultanément les deux inducteurs, de façon que leurs effets étant contraires, l'absence de courant induit constate leur égalité. Le fait que les conducteurs, à partir du cylindre, sont enroulés ensemble, permet de rapporter les effets étudiés aux cercles seulement.

L'intensité des courants induits est indépendante de la nature des circuits. Il suffit pour cela de remplacer un des anneaux de cuivre par un anneau de zinc, etc., et de constater que l'aiguille du galvanomètre est toujours au 0°.

L'intensité des courants induits est proportionnelle à celle des courants inducteurs. On remplace un des anneaux inducteurs par un anneau formé de n fils égaux; l'action inductrice de ce système est égale à celle de l'autre anneau unique, c'est-à-dire que l'action inductrice de n courants égaux chacun à $\frac{K}{n}$ est égale à celle d'un courant égal à leur somme K . On peut vérifier d'une manière analogue que l'intensité des courants induits est indépendante de la section des fils qui composent les circuits.

M. Felici a pu facilement, au moyen de ce même appareil, étendre au cas des courants induits le théorème des courants sinueux, soit quant au circuit inducteur, soit quant au circuit induit, et, en s'appuyant sur cette généralisation, déterminer la forme générale de la formule algébrique qui exprime la force électromotrice induite dans un élément. Un cas particulier d'équilibre a permis à l'auteur de déterminer l'une des constantes qui y entre; l'autre reste indéterminée, et sa valeur ne peut être obtenue qu'en expérimentant sur des circuits ouverts, seul cas du reste où la partie de la formule dans laquelle elle entre ne disparaisse pas.

Après avoir ainsi exprimé d'une manière générale la force électromotrice des courants induits par l'ouverture et la fermeture des courants inducteurs, l'auteur s'est proposé de rattacher à cette théorie la production des courants induits par le mouvement, et il pense avoir établi le théorème suivant :

Le courant induit développé dans un conducteur par la fer-

meture d'un circuit dans une position A , est égal à la somme des courants induits qui s'y développent en amenant le circuit fermé d'une position suffisamment éloignée à la position A , et plus généralement la somme des courants induits, produits par le mouvement du courant de B en A , est égale à la différence des courants induits développés par la fermeture du circuit successivement dans les deux positions A et B .

Les expériences sur lesquelles repose ce théorème montrent la proportionnalité des quantités dont l'auteur énonce l'égalité, et elles nous paraissent avoir besoin d'être étendues à des cas plus généraux, et peut-être en même temps plus simples. Quoi qu'il en soit, ce théorème admis donne le moyen de calculer les forces électromotrices induites par un mouvement quelconque, et ces formules sont d'accord avec celles de MM. Weber et Neumann.

M. Felici a ensuite abordé le cas des circuits induits ouverts qui donne lieu aux phénomènes connus sous le nom d'induction *unipolaire* ou *axiale*, étudiés déjà par Faraday, puis par MM. Weber et Matteucci. On sait qu'un aimant cylindrique, c'est-à-dire dont le magnétisme est supposé symétriquement distribué tout autour de son axe, peut produire, en tournant autour de cet axe même, des courants induits, mais à la condition que les circuits dans lesquels ils se développent aient une portion en mouvement; en d'autres termes, on trouve exactement ici la réciproque des lois de la rotation d'un courant par un aimant, c'est-à-dire que toutes les fois que l'aimant produit une action sur le courant, le mouvement du circuit produit un courant. Ce genre d'induction, qui diffère de l'induction ordinaire, en ce qu'on ne voit pas de changement relatif de position entre le circuit et l'aimant, se rattache, quant à ses lois, à l'induction ordinaire par l'expérience suivante que M. Matteucci cite le premier, et qui a été reprise avec plus de rigueur par M. Felici. On a un électro-aimant cylindrique et un disque métallique disposé perpendiculairement à l'axe du cylindre avec son centre sur cet axe. Des deux fils du galvanomètre, l'un communique avec le disque; quant à l'autre, dont la surface doit être recouverte de soie, on en forme une spirale

que l'on dispose de manière qu'il ne s'y développe pas de courant induit, lorsqu'on ferme le circuit qui aimante l'électro-aimant. Si l'on fait maintenant décrire rapidement à l'extrémité mise à nu de ce dernier fil une courbe quelconque sur le disque, en ayant soin que le fil de la spirale se superpose exactement sur la courbe décrite par son extrémité, l'aiguille du galvanomètre reste au 0°. Or, la partie du fil qui, partant d'une position dans laquelle il n'y a pas de courant produit par la fermeture du circuit de l'électro-aimant, va se placer sur le disque, donne lieu à un courant dont l'intensité peut se calculer par la méthode ci-dessus mentionnée; mais, d'un autre côté, le glissement du bout du fil sur le disque en présence de l'aimant produit un courant de sens contraire et, d'après le résultat de l'expérience, on voit que son intensité est la même que celle du premier, et l'on en conclut d'une manière générale que le courant développé par le glissement de l'extrémité du galvanomètre est égal à celui qu'il produirait dans ce même fil placé sur la courbe décrite, par la fermeture du circuit de l'électro-aimant.

Nous n'avons parlé que des recherches de M. Felici sur les circuits filiformes; il a étendu sa théorie aux corps à trois dimensions, en considérant chaque point comme le siège d'une force électro-motrice produisant un courant élémentaire qui se diffuse dans le corps tout entier. M. Felici, en appliquant le calcul au disque tournant dans l'action d'un aimant, est arrivé à des résultats conformes à ceux qu'a signalés M. Matteucci dans son étude spéciale sur ce cas de l'induction.

§ 5. Perfectionnements apportés aux appareils d'induction.

L'induction électro-dynamique est, depuis quelques années, l'objet de nombreuses et intéressantes recherches et, depuis la publication de notre premier volume dans lequel nous avons traité cette branche de l'électricité, on est parvenu à quelques résultats nouveaux dont nous croyons utile de donner ici l'analyse.

Nous avons donné la description complète¹ de l'appareil Ruhmkorff, y compris les perfectionnements apportés par M. Fizeau, consistant en un condensateur dont les deux lames communiquent avec les extrémités du fil inducteur; mais cet appareil, quelque simple qu'en paraisse la théorie, donnait lieu souvent à des difficultés par la manière dont il fonctionne dans certaines circonstances. Les recherches récentes de M. Poggen-dorff² ont fait disparaître ces difficultés, et l'analyse complète de ce qui se passe dans l'appareil Ruhmkorff a de plus l'avantage de montrer d'une manière logique quelle est la meilleure disposition à donner aux diverses pièces qui le composent. Voici les principaux résultats de ce travail.

La construction de l'hélice inductrice ne donne lieu à aucune observation importante. L'hélice induite n'est généralement pas construite d'une manière convenable, en ce sens qu'elle est formée d'un grand nombre de couches superposées et que les deux extrémités du fil se trouvent sur le même bout de l'hélice, ce qui fait que le développement des deux tensions qui y sont contraires et les plus grandes possibles, est nécessairement contrarié. Le meilleur moyen pour diminuer cet inconvénient est de diviser l'hélice en hélices partielles composées chacune d'un nombre impair de couches, ce qui fait que pour chacune les deux extrémités du fil sont aux deux bouts opposés. En outre, M. Poggen-dorff pense qu'il y aurait avantage à remplacer le vernis solide par un liquide isolant, car une étincelle partant entre deux spires voisines ne détruirait l'isolement que d'une manière temporaire.

L'interrupteur est ordinairement mis en mouvement par le faisceau des fils de fer qui se trouve dans les hélices. Il est avantageux de faire de cet interrupteur une pièce distincte mise en mouvement par un électro-aimant particulier. M. Poggen-dorff s'est servi de deux interrupteurs différents, dont l'un produisait l'interruption du courant à l'intérieur d'un liquide iso-

¹ Tome I, page 395.

² Poggen-dorff, *Annalen*, t. XCIV, p. 289. *Annales de chimie et de physique*, t. XLIV, p. 375.

lant, et l'autre consistait en un électro-aimant tournant sous l'action d'un aimant en fer à cheval.

Le condensateur, auquel M. Poggendorff donne la préférence, est composé d'une feuille de mica recouverte d'étain sur les deux faces; la différence d'action des condensateurs résultant de la différence de leur surface ne se fait sentir que lorsque l'on se place dans des conditions telles que l'extra-courant dans le fil inducteur soit énergique, c'est-à-dire lorsqu'on fait usage d'un grand nombre d'éléments et d'un fil long et fin.

On peut distinguer dans le mode d'action de l'appareil trois cas différents.

Premier cas. Le circuit induit étant fermé par un conducteur solide ou liquide, il s'y développe des courants de directions alternativement contraires; les courants de directions opposées sont égaux en quantité, mais différents en durée.

Deuxième cas. Les deux extrémités du fil induit sont séparées par de l'air ou par un gaz quelconque. Il arrive alors que le courant induit direct est le seul qui se développe et que l'hélice induite présente deux pôles bien définis. En effet, les extrémités du fil induit étant trop éloignées pour qu'il se développe des étincelles, si l'on approche un électroscope de l'une de ces extrémités, il se charge d'électricité d'une nature constante et dont le signe indique qu'elle résulte du courant induit direct. En outre, en rapprochant les extrémités du fil de façon à produire des étincelles, on constate soit à l'aide du galvanomètre, soit par des procédés électro-chimiques, qu'elles sont dues au courant direct.

Cette différence dans la tension des deux courants induits peut s'expliquer de la manière suivante. Au moment où le circuit se ferme, l'extra-courant qui s'y produit diminue la tension du courant induit inverse; on peut placer le courant induit direct dans des conditions analogues, en faisant passer le courant principal à travers un seul des fils de l'hélice inductrice et en réunissant les deux extrémités du second; le courant induit dans ce second fil réagit alors sur l'induit direct au point de faire disparaître toute étincelle.

M. Poggendorff a fait quelques expériences en plongeant

l'appareil interrupteur dans un liquide et en supprimant le condensateur. Dans des liquides très-conducteurs, on n'obtenait que de faibles étincelles à cause de l'influence de l'extra-courant qui pouvait librement s'établir. Avec des liquides complètement isolants, les étincelles étaient également faibles, car alors l'appareil, dépourvu de condensateur, fonctionnait comme dans l'air; mais avec des liquides mauvais conducteurs, l'alcool, l'eau distillée, les étincelles étaient très-fortes, le liquide jouant ici le rôle de condensateur.

Ces expériences ont conduit M. Poggendorff à placer l'interrupteur dans de l'air raréfié à une pression de 3 à 4 millimètres de mercure. Les étincelles d'induction sont devenues tout aussi fortes que par l'emploi du condensateur; cependant les étincelles toujours très-fortes qui se produisent dans l'appareil interrupteur altèrent promptement les surfaces métalliques.

Troisième cas. Les extrémités du fil induit sont séparées par un milieu isolant solide ou liquide. Si les extrémités du circuit induit sont des fils de grosseur ordinaire, il ne se produit aucun phénomène; mais s'il est terminé par des plaques d'une certaine étendue séparées par la lame non conductrice, ce condensateur se charge sous l'influence de chaque courant induit et se décharge immédiatement par le fil induit lui-même. On ne peut constater aucune accumulation d'électricité sur les plaques, et l'on entend des bruits qui indiquent le passage continu de l'électricité dans un sens et dans l'autre entre les plaques et la lame isolante.

Si, en même temps que les extrémités du fil induit communiquent avec un condensateur, on fait communiquer ses deux armatures avec deux boules ou deux pointes rapprochées l'une de l'autre, il passe entre ces deux boules des étincelles plus fortes que les étincelles ordinaires induites, ce qui provient de ce que le condensateur chargé par le courant induit se décharge presque totalement par ces boules à cause de la grande résistance du fil induit.

Le moyen d'augmenter la puissance de l'appareil Ruhmkorff a été aussi l'objet des recherches de M. Foucault, qui a eu l'in-

genieuse idée de faire fonctionner simultanément plusieurs appareils à la fois¹. En effet l'obstacle qui s'oppose toujours à l'augmentation de l'énergie des étincelles induites est la difficulté d'interrompre instantanément le courant inducteur, difficulté qui croît à mesure que celui-ci devient plus intense et le fil conducteur plus long. Or, si l'on arrive à disposer plusieurs machines inductrices de façon à fonctionner d'une manière parfaitement concordante, l'étincelle de l'extra-courant dans chacune d'elles ne sera pas plus forte que si elle fonctionnait seule, et la puissance du courant induit sera augmentée proportionnellement au nombre des appareils.

M. Foucault a réussi à obtenir la concordance de deux appareils de la manière suivante. Le courant partant du pôle positif de la pile pénètre en se bifurquant dans les bobines inductrices; chacun des courants partiels traverse un interrupteur, puis ils se réunissent pour revenir au pôle négatif; de cette façon les deux machines sont indépendantes l'une de l'autre, mais il suffit de réunir les deux circuits partiels par un conducteur communiquant de part et d'autre avec le fil inducteur entre la bobine et l'interrupteur; l'accord s'établit alors et le système fonctionne avec la puissance d'une machine double. Les étincelles induites sont bruyantes, sinueuses et longues de 16 à 18 millimètres. En opérant avec deux machines il faut, pour maintenir l'isolement du fil induit, établir les communications de telle sorte que les tensions positives et négatives s'accumulent aux extrémités externes et libres du conducteur; en opérant avec un plus nombre d'appareils, cet isolement offrirait d'assez grandes difficultés.

M. Foucault a ajouté un nouveau perfectionnement² à l'appareil d'induction de Ruhmkorff en employant, comme je l'avais déjà fait³, le mercure comme interrupteur, mais en recouvrant sa surface d'une couche d'alcool pour prévenir son oxydation qui résulterait de la chaleur produite dans l'air par la forte

¹ *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. XLII, p. 215. *Archives des sciences physiques et naturelles*, t. XXXI de la 4^e série, p. 243.

² *Compte rendu de l'Académie des Sciences*, t. XLIII, p. 44.

³ Tome I, pages 298 et 389.

étincelle de l'extra-courant. Une lame élastique en cuivre, recourbée et terminée par une pointe de platine, vient fermer une soixantaine de fois par seconde le circuit inducteur en pénétrant par cette pointe un plus moins grand nombre de fois dans le mercure. Le contact qui s'établit alors n'en est pas moins parfait, malgré sa courte durée; ces contacts se succèdent à des époques régulièrement distribuées dans le temps, ainsi qu'on peut en juger par la persistance du son rendu, qui est le même que celui que rend la série d'étincelles qui éclatent aux extrémités du fil induit. Lorsqu'on a plusieurs machines on les réunit par paire; on supprime les marteaux qu'on remplace par des conducteurs à demeure; on réunit les deux fils inducteurs à la suite l'un de l'autre et l'on introduit dans le circuit l'interrupteur accompagné du condensateur d'extra-courants. Par précaution, chaque machine doit conserver ses fils de décharge écartés à distance normale; elles conservent aussi chacune leurs commutateurs qui servent à diriger respectivement les deux parties du courant en sens tels que des tensions de signes contraires s'accumulent aux extrémités internes des deux fils induits; ceux-ci enfin étant mis en communication, les bouts extérieurs qui restent libres, deviennent les deux pôles du système et donnent des étincelles à la distance de 30 à 35 millimètres pour deux appareils associés de manière à former une paire. Quand on veut placer plus de deux machines sous la conduite de l'interrupteur à mercure, il devient nécessaire d'isoler avec un soin tout particulier ces appareils surnuméraires, c'est-à-dire d'établir dans ces appareils un isolement absolu entre le fil inducteur de la surface intérieure de l'hélice induite; cet isolement s'obtient d'une manière complète en glissant un tube de verre dans l'espace annulaire qui sépare les deux hélices concentriques. A partir du moment où, par les soins de M. Ruhmkorff, cette condition a été remplie, quatre machines réunies ont donné les effets de tension qu'on en pouvait attendre, et le flux des étincelles s'est élancé à la distance de 7 à 8 centimètres. Il n'est pas nécessaire d'insister sur les effets remarquables qu'on peut produire au moyen d'un appareil aussi puissant. Le passage de ces étincelles, déjà si longues, à travers la flamme

d'une lampe à alcool, permet d'éloigner encore plus les électrodes de manière à avoir des étincelles bien plus longues encore et qui en se déchargeant à travers la vapeur d'alcool, rendent un son tout à fait particulier semblable à celui d'une trompette. L'emploi du condensateur d'induction communique aux étincelles un pouvoir éclairant considérable.

Nous ne devons pas oublier de rappeler, en terminant ce paragraphe, que si c'est M. Fizeau qui a eu l'idée de faire communiquer les deux extrémités du fil inducteur avec les deux armatures d'un condensateur, c'est à M. Grove qu'on doit le perfectionnement qui consiste à mettre les deux extrémités du fil induit également en communication avec les deux armatures d'un condensateur tel qu'une bouteille de Leyde par exemple; il en résulte, comme nous l'avons vu, un accroissement considérable dans la puissance des étincelles données par le fil induit. Ce phénomène est d'autant plus remarquable qu'on avait essayé souvent, mais en vain, de charger une batterie électrique par le contact de ses deux armatures avec les deux extrémités d'un fil induit; mais on n'avait jamais obtenu que des effets très-faibles, l'électricité communiquée par le courant induit à la batterie se déchargeant à travers le fil induit lui-même. Ici la décharge a lieu, du moins en grande partie, en traversant sous forme d'étincelle la couche d'air qui sépare les deux pointes métalliques voisines l'une de l'autre et communiquant avec les deux armatures; si la décharge ne se fait pas, du moins entièrement, à travers le fil induit, c'est que ce fil est encore soumis à des actions inductrices qui s'opposent à ce qu'il serve au retour de la décharge¹.

§ 6. Nouvelles recherches sur la polarité diamagnétique et sur le diamagnétisme en général.

Dans la théorie que nous avons donnée du diamagnétisme, dans la troisième partie de ce Traité², nous sommes arrivés, en

¹ Voyez *Philosophical magazine*, t. IX, p. 1 (janvier 1855), et *Annales de chimie et de physique (N. S.)*, t. XLIII, p. 379.

² Tome I, p. 568 et suiv.

nous basant sur les faits, à admettre l'existence d'une polarité diamagnétique. Les recherches qui ont été faites depuis lors viennent confirmer cette conclusion que nous avons tirée principalement des expériences de Weber.

Nous avons remarqué qu'un des principaux arguments en faveur de l'hypothèse du développement d'une polarité spéciale dans les corps diamagnétiques, était que la répulsion exercée par un électro-aimant ou un aimant sur ces corps, varie proportionnellement au carré de l'intensité du magnétisme, ce qui prouve, comme je l'avais fait observer, que le corps diamagnétique ne joue pas un rôle purement passif dans le phénomène, mais qu'il y a sa part aussi bien que le corps aimanté, et par conséquent qu'il éprouve une induction analogue, quoique non semblable, à celle qu'éprouve un corps magnétique, dans des circonstances pareilles. La loi que nous venons de rappeler, découverte par M. E. Becquerel et confirmée par M. Tyndall, vient de recevoir une nouvelle confirmation de M. Reich, qui s'est servi dans ce but de la grande balance de torsion au moyen de laquelle il avait mesuré la densité moyenne de la terre¹. Il a suspendu à l'extrémité du levier horizontal de cette balance une boule de bismuth, et il en a approché tantôt un barreau aimanté, tantôt un électro-aimant. L'intensité des barreaux aimantés était mesurée par l'action qu'ils exerçaient sur une petite aiguille placée à une grande distance; l'intensité de l'électro-aimant était regardée comme proportionnelle à celle du courant voltaïque, et l'intensité de la répulsion était mesurée par le déplacement du bras de levier de la balance. Les répulsions observées ont varié à peu près comme le carré de l'intensité du magnétisme, mais sans suivre exactement cette loi; différence qui peut s'expliquer, comme le remarque M. Reich, par la variation de la distance entre la boule de bismuth et l'aimant, qui résulte du mouvement même de la balance.

M. Tyndall, à l'appui des conclusions déjà tirées des expériences de M. Reich, avait montré qu'un corps diamagnétique

¹ *Archives des sciences physiques (B. univ.)*, t. XXXI, p. 337.