

tante. Le baryum et le calcium pourront être produits en grande quantité le jour où on leur aura trouvé une application industrielle. Les minerais renfermant du molybdène ne sont pas rares, et ce métal pourrait être obtenu au même prix que l'étain si on en avait l'emploi. Le vanadium et le thallium peuvent être fabriqués en grandes quantités, mais on connaît peu leur rôle dans les alliages. Des propriétés spéciales et parfois précieuses sont communiquées à des métaux en les alliant à des quantités souvent très faibles d'autres métaux. Les qualités spéciales de dureté communiquées au platine par son alliage avec l'iridium sont connues. Une faible quantité de tellure fait disparaître la structure cristalline du bismuth. Un cinq-centième de zirconie accroît considérablement la dureté de l'or, tandis que la même proportion de bismuth réduit sa ténacité dans de grandes proportions. Le chrome, le cobalt, le tungstène, le titane, le cadmium, le zirconie, sont bien connus dans les arts métallurgiques; les qualités que le chrome, le tungstène communiquent à l'acier, ont reçu une sérieuse confirmation à l'Exposition internationale de 1889, mais on connaît peu les propriétés de ces métaux pris isolément. Les recherches faites en vue d'éclaircir les points obscurs relatifs aux propriétés des nouveaux alliages, récompenseront largement de leurs peines les chimistes et les analystes qui entreprendront ces recherches et sauront les mener à bonne fin.



LES EXPÉRIENCES DE LAUFFEN-FRANCFORT¹

LA LIGNE — LES TRANSFORMATEURS D'ARRIVÉE
L'ÉCLAIRAGE — LES MOTEURS.

Ligne. — L'énergie électrique produite à Lauffen sous forme de courants alternatifs à trois phases est transmise à Francfort sur une ligne aérienne à trois fils de cuivre de 4 millimètres de diamètre, fixés sur des poteaux à l'aide d'isolateurs à pétrole.

Cette expérience est d'autant plus intéressante qu'elle est faite sur une grande échelle, car il y a plus de 5000 poteaux et près de 10000 isolateurs d'installés entre Lauffen et Francfort. Comme il y aurait le plus grand danger à toucher les fils et même les poteaux dans le cas d'une rupture d'un isolateur ou de contact accidentel, même imparfait, entre un poteau et l'un quelconque des fils, on a prévenu du danger les populations des différents États que la ligne traverse en peignant en noir, sur un grand nombre de ces poteaux, surtout au voisinage des routes et sentiers, des ossements en croix surmontés d'une tête de mort. Signalons, sans insister ni apprécier, le caractère un peu macabre de ce mode d'avertissement, tout en reconnaissant que la précaution n'est pas inutile.

Comme mesure de précaution supplémentaire, on a disposé, près des passages à niveau de la ligne de chemin de fer que la ligne électrique longe presque continuellement, des sortes de A renversés en fer suspendus au-dessus des fils et maintenus, à une certaine distance, par une corde passant sur une poulie. Il suffit de détacher la corde pour faire tomber le A sur les fils. On met ainsi la ligne en court-

circuit, les coupe-circuits fusibles sont aussitôt volatilisés par suite de l'excès de courant qui les traverse, et la ligne immédiatement et automatiquement isolée de la génératrice. Tant que le A est sur la ligne, on peut impunément toucher à cette ligne et l'utiliser comme simple ligne téléphonique, le retour se faisant par la terre. C'est, du reste, par ce procédé rudimentaire que Francfort communique avec Lauffen. Pendant les arrêts, la ligne à trois fils est toujours sur téléphone. Pendant la marche, Lauffen peut appeler Francfort en arrétant, et Francfort appelle Lauffen en mettant la ligne en court-circuit, et en faisant ainsi sauter les coupe-circuits.

Les expériences de Lauffen-Francfort ont surtout pour but, nous l'avons déjà dit, de fixer les limites des tensions que peuvent supporter des lignes aériennes montées sur isolateurs au pétrole. Si le rendement est indépendant de la distance tant que l'on a la faculté d'augmenter le potentiel proportionnellement à la distance, il n'en est plus de même lorsque l'on est à la limite de potentiel que la ligne peut pratiquement supporter. Le rendement est alors parfaitement dépendant de la distance, et il diminue à mesure que cette distance augmente. Dans le cas particulier, la résistance de chacun des trois fils étant d'environ 500 ohms, pour transmettre une puissance électrique totale de 150 000 watts au potentiel efficace de 12 000 volts, on devrait faire passer 4 ampères et perdre en échauffement sur la ligne 5000 watts par fil, soit 15 000 watts pour les trois fils, ou 10 pour 100 de la puissance totale, sans parler des pertes par les isolateurs, pertes sur lesquelles les estimations varient de 1 à 10, et dont nous ne parlerons qu'après la publication des résultats des expériences officielles.

Comme la perte de charge en ligne varie avec le débit, la différence de potentiel est maintenue constante, non pas au départ, mais bien à l'arrivée, à Francfort. A cet effet, les voltmètres disposés à Lauffen sont munis d'un double enroulement qui fait retarder le voltmètre, tient compte de la perte de pression sur la ligne et leur font donner les mêmes indications que s'ils étaient montés en dérivation sur la sortie des transformateurs de Francfort.

Transformateurs d'arrivée. — Les courants polyphasés de haute tension arrivant à Francfort avec la pression du départ diminuée de la perte de charge en ligne, et avec une intensité également moindre qu'au départ, par suite des dérivations sur la ligne, communiquent directement avec un ou plusieurs transformateurs identiques à ceux de Lauffen, mais qui jouent un rôle inverse : ils augmentent l'intensité des courants aux dépens de la pression.

Il y a à Francfort, comme à Lauffen, trois transformateurs que l'on peut coupler sur la ligne et sur les appareils d'utilisation en faisant des combinaisons multiples qui permettent de varier les tensions et les intensités entre des limites très écartées. Chacun de ces transformateurs est d'ailleurs établi pour pouvoir transformer les 200 kilowatts que peut

¹ Suite et fin. — Voy. n° 957, du 5 octobre 1891, p. 274.

produire la machine génératrice à charge normale maxima. Nous obtenons ainsi sur le circuit secondaire des transformateurs établis à Francfort des courants alternatifs triphasés qu'il nous reste à utiliser pour l'éclairage et la force motrice. La figure 1 montre comment le transformateur est relié d'une part directement à la ligne à haute tension, d'autre part au tableau de distribution permettant d'envoyer à volonté le courant transformé sur les lampes à

incandescence, les moteurs triphasés ou tous autres appareils d'utilisation que doit desservir le réseau de distribution à basse tension.

Éclairage. — Étant donné qu'il existe entre le point neutre et chacun des trois fils secondaires, une différence de potentiel efficace de 50 à 65 volts environ, suivant le réglage effectué à Lauffen, il suffit de monter des groupes de lampes entre ce point neutre et chacun des trois fils pour que ces lampes fonction-

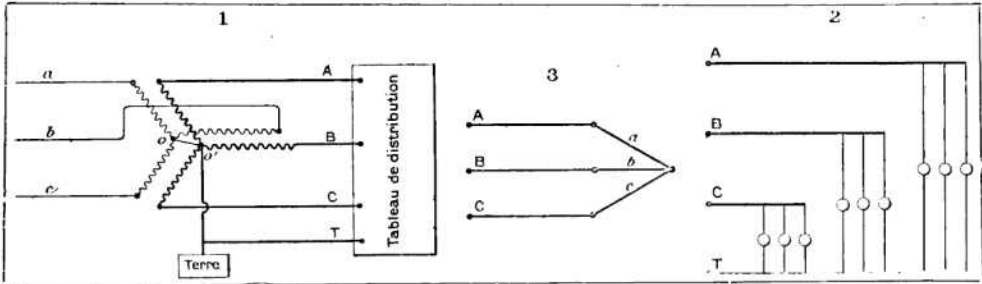


Fig. 1, 2 et 3. — Diagrammes de montage et de couplage. — Fig. 1. Montage d'un transformateur à Francfort. — *a, b, c*, fils d'arrivée à haute-tension. — *A, B, C*, fils de sortie à basse tension. — *T*, Fil neutre relié à la terre et aux points neutres des deux enroulements. — *o, o'*, Coupe circuit fusible. — Fig. 2. Montage des lampes à incandescence ordinaires en dérivation entre le fil neutre *T* et chacun des trois fils *A, B, C*. — Fig. 3. Couplage d'une lampe à 3 filaments *a, b, c* sur les trois fils *A, B, C* venant du transformateur.

nent comme avec des courants alternatifs ordinaires. On dispose les lampes (fig. 2) pour que chacun des trois groupes se trouve également chargé, mais il n'est pas nécessaire de maintenir une rigoureuse égalité dans le débit des trois circuits.

Le transformateur compense automatiquement les petites différences de potentiel que pourraient produire des débits inégaux. A titre de curiosité, M. Dolivo-Dobrowolsky a fait fonctionner sur le circuit une lampe à trois filaments (fig. 4) réunis par leur sommet, les trois bouts libres communiquant avec les trois fils du transformateur (fig. 5). Le fait paraît paradoxal lorsque l'on n'est pas familiarisé avec les propriétés des courants polyphasés, car les trois filaments sont d'égale grosseur. Il faut donc que le courant traversant chacun des filaments soit égal, à chaque instant, à la somme des deux autres, et nous avons dit, dans notre précédent article, que c'est précisément là une des propriétés des courants alternatifs triphasés.

En adoptant une différence de potentiel de 60 à 65 volts entre le fil neutre et chacun des trois autres fils, il serait également possible de monter des ampes à arc en dérivation, et de les alimenter comme des lampes à incandescence.

Dans les expériences auxquelles nous avons assisté, il n'y avait que des lampes à incandescence, au nombre de 1100 environ; les lampes étaient alimentées par le courant secondaire provenant du transformateur, ainsi que les moteurs électriques.

Il nous reste à décrire les appareils qui justifient et rendent même nécessaires, jusqu'à nouvel ordre, l'emploi des courants alternatifs triphasés pour le transport et la distribution de l'énergie électrique.

Mais avant d'aborder cette description, il nous faut ouvrir une parenthèse consacrée à l'indication du principe des champs magnétiques tournants.

Champs tournants. — Si nous faisons passer un courant alternatif dans une bobine, ce courant alternatif produira à l'intérieur de cette bobine et en son centre un champ magnétique dont la direction sera perpendiculaire au plan de la bobine, et dont l'intensité sera, à chaque instant, proportionnelle à celle du courant qui le produit. La direction du champ sera constante, mais son sens changera en même temps que celui du courant qui lui donne naissance. Concevons deux bobines semblables placées perpendiculairement l'une à l'autre et traversées par deux courants alternatifs de même période, mais décalés l'un par rapport à l'autre de un quart de période.

Chaque bobine agira comme si elle était seule et produira en son centre un champ perpendiculaire à son plan, mais les deux champs se composeront en un champ unique résultant dont la direction et la grandeur à chaque instant s'obtiendront par une construction analogue à celle qui, en mécanique, donne la résultante de deux forces différant en grandeur et en direction. Dans le cas de deux courants obéissant rigoureusement à la loi du sinus, le champ

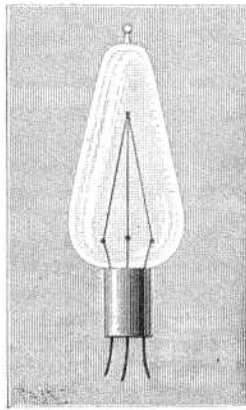


Fig. 4. — Lampe à incandescence à 3 filaments.

résultant à une intensité constante, mais sa direction change avec le temps. En supposant les deux bobines verticales et disposées rectangulairement, on démontre que la direction du champ décrit un cercle horizontal d'un mouvement uniforme. Deux courants alternatifs

décclés de un quart de période et traversant des bobines disposées à angle droit produisent donc un champ magnétique tournant.

C'est M. le professeur Ferraris, de Turin, qui a publié le premier, en mars 1888¹, les propriétés

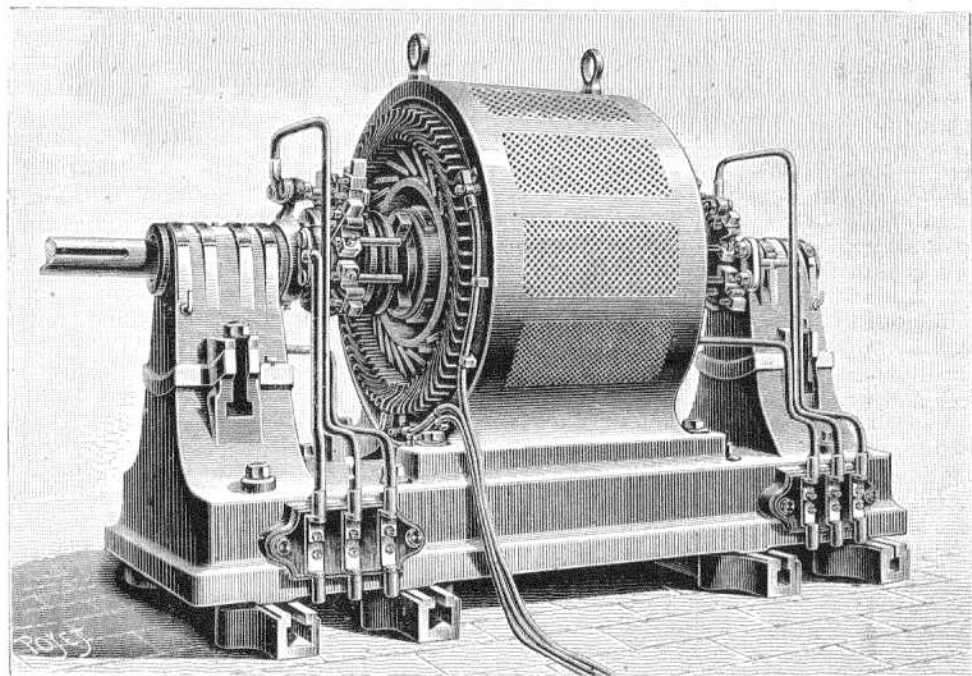


Fig. 5. — Moteur à courants alternatifs triphasés actionnant la cascade à Francfort.

des champs magnétiques tournants et montré le premier moteur électrique fondé sur leur emploi. Les publications de M. T. Tesla sur le même sujet n'ont été faites qu'au mois de mai de la même année, bien que des brevets aient été déposés en octobre 1887 en Amérique. Rien d'étonnant d'ailleurs que la même idée ait pu germer indépendamment et vers la même époque dans le cerveau de plusieurs inventeurs et dans différents pays, et nous ne croyons diminuer en rien la valeur des travaux de M. Tesla en attribuant à M. le professeur Ferraris le mérite d'avoir exposé le premier, nettement et clairement, les principes et la théorie d'une idée dont on se dispute aujourd'hui si âprement la priorité dans les cercles électriques industriels.

Toutes questions de véritable priorité réservées, revenons à notre champ tournant. Plaçons une masse de cuivre au milieu des deux bobines, cette masse de cuivre pouvant tourner autour de l'intersection des plans des deux bobines comme axe. Cette masse étant supposée immobile et le champ tournant, le dépla-

cement relatif sera le même que si le champ restait fixe et la masse se déplaçait dans le champ; elle sera donc le siège de courants induits, ou courants de Foucault d'autant plus intenses que le champ sera lui-même plus intense. Il s'exercera donc, en vertu des lois d'Ampère relatives aux actions des courants sur les courants, des actions mécaniques entre les circuits fixes et la masse de cuivre. Mais la loi de Lenz nous apprend que le déplacement produit par ces actions mécaniques doit donner naissance à une force contre-électromotrice tendant à diminuer l'intensité des courants induits. Dans le cas particulier, les courants induits seront d'autant moins intenses que le déplacement relatif du

champ et du cylindre de cuivre sera plus faible; ce cylindre de cuivre tournera dans le même sens que le champ, avec une vitesse angulaire qui tend à être égale à celle du champ. Le champ entraînera donc le

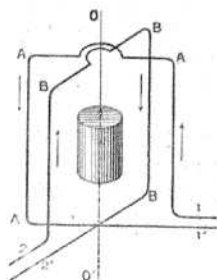


Fig. 6. — Principe des moteurs à champ tournant. — AAA. Premier circuit. — BBB. Second circuit. — OO'. Axe de rotation.

¹ Rotazioni elettrodinamiche prodotte per mezzo di correnti alternate. Nota del prof. Galileo Ferraris. Accademia delle scienze di Torino, 18 mars 1888. — In-8°, Torino, 1888.

cylindre. Remplaçons les bobines inductrices et le cylindre de cuivre massif par des enroulements combinés en vue de réduire les résistances magnétiques et de supprimer les courants parasites, et nous réaliserons un véritable *moteur à champ magnétique tournant*. On remarquera que dans l'appareil théorique que nous venons de décrire sommairement, et que le diagramme (fig. 6) reproduit en fac-similé d'après le mémoire original de M. Ferraris, il n'y a sur l'inducteur ou sur l'induit, aucun contact frottant, ni aucune interruption possible entre le générateur et le moteur autre que l'interrupteur, ni aucune communication électrique entre l'inducteur et l'induit. L'induit constitue un circuit fermé sur lui-même, et ne comporte aucune pièce frottante; l'entretien du moteur se réduit donc au graissage périodique des deux paliers dans lequel tourne son axe : c'est le dernier mot de la simplicité.

Au moment de la mise en circuit, l'induit étant immobile par rapport au champ tournant est le siège de courants très intenses, ce qui ne présente pas d'inconvénients pour les moteurs de faible puissance, mais serait dangereux avec les moteurs de grande puissance; aussi, pour ces derniers, le démarrage se fait-il en intercalant dans le circuit induit des résistances que l'on diminue graduellement jusqu'au moment où l'armature se trouve en court-circuit.

Ce que nous venons de dire pour les courants alternatifs à deux phases est également vrai pour les courants alternatifs à trois phases; seulement les courants qui produisent le champ tournant sont décalés de un tiers de période, et il y a trois bobines au lieu de deux, le principe reste le même.

Moteurs. — Les moteurs sont construits par l'*Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft*, sous la direction de M. Dolivo-Dobrowolsky, à qui revient le mérite d'avoir réalisé les premiers moteurs triphasés et de leur avoir donné une forme industrielle.

Nous avons vu que les transformateurs de Francfort nous fournissent trois courants alternatifs décalés, sur lesquels nous avons appris à brancher des lampes à incandescence à trois filaments, ou, plus simplement, des lampes à incandescence ordinaires, entre le fil neutre et chacun des trois fils. Les moteurs à courants alternatifs se couplent également sur les trois fils, comme les lampes à incandescence spéciales, sans faire intervenir le point neutre, mais les dispositions de ces moteurs varient avec leur puissance. Pour les moteurs de faible puissance, les inducteurs sont fixes et l'induit mobile, comme dans le moteur de principe de M. Ferraris (fig. 6). Cet induit est constitué par une série de disques de tôle mince, percés à la périphérie de trous parallèles à l'axe dans lesquels passent des tiges de cuivre isolées électriquement du cylindre, mais réunies entre elles à leurs extrémités par deux couronnes de même métal. Autour de cet induit sont disposés les trois enroulements combinés pour produire un champ tournant dans l'espace cylindrique occupé par le

cylindre induit. La rotation s'effectue par suite des courants induits dans les tiges de cuivre. Pour changer le sens de la rotation, il suffit de changer le sens du courant dans deux des trois bobines, à l'aide d'un inverseur double. Dans des expériences auxquelles nous avons assisté, un moteur de deux chevaux du type de 1500 watts, actionnant une dynamo à courants alternatifs qui en produisait environ 2000, a eu son sens de rotation changé en moins de deux secondes par la simple manœuvre du commutateur. L'inversion de sens de la rotation du moteur se produit à vide dans le même temps. Cette expérience frappante montre quel couple initial considérable possèdent les moteurs à courants polyphasés au moment du démarrage, et établit nettement la supériorité indiscutable de ces appareils sur les moteurs synchrones. Mais il y a plus : une surcharge du moteur ne produit qu'un ralentissement de vitesse angulaire, ralentissement d'autant plus grand que la surcharge est plus grande, tandis qu'une surcharge un peu forte d'un moteur à courants alternatifs synchrones provoque son arrêt presque immédiat.

Pour les moteurs de grande puissance, tel que celui établi à Francfort et qui doit absorber environ 75 kilowatts, les dispositions sont différentes, bien que le principe reste le même. Le système inducteur est mobile, tandis que le circuit induit est fixe.

Les trois bobines induites sont tout à fait indépendantes, électriquement parlant, et les deux extrémités de chacune d'elles aboutissent à une bague collectrice sur laquelle appuient deux balais, afin d'assurer le contact et de pouvoir enlever un des balais en cas de besoin, pour le nettoyer ou le réparer. L'emploi de six bagues collectrices est spécial au moteur de Francfort, qui est surtout un moteur d'expériences. Cette disposition a pour but de permettre le couplage des trois circuits soit en triangle, soit en étoile. En pratique, on adoptera le couplage le plus favorable dans chaque cas particulier; le nombre de bagues se trouvera alors réduit à trois. Le circuit induit est fixe dans l'espace et entoure le circuit inducteur. Il se compose également de trois enroulements distincts couplés entre eux en étoile, et fermés sur eux-mêmes en intercalant des rhéostats à liquide sur chacun des circuits. Le but de ces rhéostats est de réduire l'intensité des courants induits au moment du démarrage, lorsqu'il y a grand déplacement relatif du champ et du circuit induit. Le but des trois enroulements distincts est de coupler ensemble les fils induits qui se trouvent dans la même position relative par rapport aux inducteurs, et d'égaliser ainsi le couple moteur moyen résultant. Il n'y a aucune connexion électrique entre les inducteurs mobiles et l'induit fixe. L'enroulement de ces deux circuits est fondé sur le principe d'enroulement du tambour de Siemens et l'emploi d'inducteurs multipolaires, afin de réduire la vitesse angulaire, eu égard à la fréquence employée, et sur l'emploi de barres de cuivre montées dans des trous ménagés dans le fer constituant le circuit ma-