

dant la tempête, nous écrit M. L. Sully, habitant à Saint-Pierre (Martinique), les éclairs étaient incessants; ils allaient en croissant et ensuite décroissaient en intensité et en quantité avant et après le passage du centre; fait remarquable, le bruit du tonnerre a été très peu appréciable, ce qui proviendrait peut-être du bruit infernal que faisaient les éléments déchainés et à l'écroulement des tuiles et toitures des maisons dévastées. La foudre globulaire s'est montrée très souvent, au point que les habitants de la campagne, qui au fort de l'ouragan ont dû fuir leur maison cultivée, parlent comme d'une chose fort commune de ces boules de feu qui parcourent l'air pendant plusieurs minutes, en pétillant, et éclataient environ à 50 centimètres de la surface du sol.

M. G. Bordaz, à Sainte-Marie de la Martinique, nous envoie d'autre part la lettre suivante, qui donne de tristes détails sur l'ensemble du sinistre :

Le mardi, 18 août, après une journée pluvieuse, le

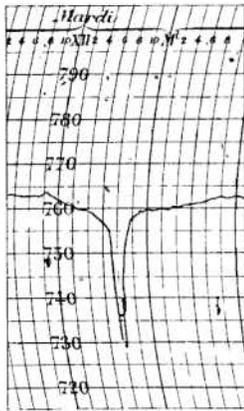


Fig. 4. — Courbe barométrique d'un enregistreur Richard pendant le cyclone de la Martinique. (Communiqué à *La Nature* par M. L. Sully, à Saint-Pierre, de la Martinique.)

baromètre baissa d'une façon inquiétante et sur les huit heures du soir l'ouragan se déchainait, transformant en quelques minutes ce pays si riche en un amas de ruines. Le vent passa alternativement du nord-est au sud, ne laissant pour ainsi dire aucun point intact dans son évolution. Fort-de-France, qui commençait à peine à se relever de ses ruines, est de nouveau rejeté au même état que le lendemain de l'incendie. Saint-Pierre est ravagé. Le Morne-Rouge, le gros Morne, le Robert, le François, le Vauclin, le Laumartin, toutes bourgades florissantes et peuplées, n'existent plus que

de nom. La Trinité, Sainte-Marie, le Marigot, la Basse-Pointe et presque toutes les autres communes de l'île ont perdu, les unes un tiers, les autres la moitié de leurs constructions.

Les campagnes sans exception sont rasées, il ne reste ni habitation, ni récolte. Dans ce pays à verdure éternelle, on se croirait au cœur d'un de nos plus rudes hivers : les arbres sans une feuille, déchiquetés par l'ouragan, sont ou renversés, ou brisés. Ceux qui ont résisté à la tourmente ne présentent plus qu'un tronc sans rameaux, comme sec ou mort. Les navires étrangers en station dans les grandes rades, les nombreux caboteurs qui font le service de l'île, les vapeurs employés au transport des voyageurs, ont tous péri en mer, ou ont été jetés à la côte. Les morts se comptent par centaines dans l'île, les blessés sont nombreux, et je ne parle point des malheureux marins, dont on ne connaîtra jamais exactement le sort.

Il ne se passe pas de jours que des corps viennent échouer au rivage. Quelle force de vitalité faudra-t-il à notre malheureuse colonie pour se relever après tant de désastres? Pour se rendre compte de ce qu'a pu être la puissance du vent pendant la tourmente, il suffira de savoir

qu'un train de fourgons a été mis en mouvement par le vent, remontant une pente et qu'il a déraillé à quelques centaines de mètres de là.

On pourra juger, d'après les récits qui précèdent, de l'intensité de la catastrophe qui vient de ruiner un pays si prospère : 420 morts, 1400 blessés, 50 millions de francs de perte, tel aura été le bilan pour la Martinique, de la sinistre journée du 18 août 1891.

GASTON TISSANDIER.

LES EXPÉRIENCES DE LAUFFEN-FRANCFORT

TRANSMISSION ET DISTRIBUTION
DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE A GRANDE DISTANCE
PAR COURANTS ALTERNATIFS POLYPHASÉS

Le monde électrique suit avec le plus grand intérêt les expériences de transport et de distribution de l'énergie électrique qui se poursuivent actuellement entre Lauffen et Francfort, sur une distance de 175 kilomètres, expériences dont les premiers résultats sont des plus remarquables et font bien augurer de l'avenir.

Les procédés mis en œuvre sont absolument différents de ceux qui avaient été employés jusqu'ici dans le même but, et il eût été difficile d'en prévoir l'application il y a trois ans à peine, car les courants alternatifs polyphasés faisaient alors leur apparition pour la première fois. Avant de décrire les moyens qui ont permis de réaliser ces mémorables expériences, il nous semble utile d'indiquer rapidement comment on y a été conduit.

Malgré le retentissement des expériences de transport de force motrice réalisées par M. Marcel Deprez entre Miesbach et Munich, Vizille et Grenoble, Creil et Paris, malgré les sommes considérables englouties dans ces expériences, le succès industriel a été médiocre, les installations actuellement en fonction sont encore peu importantes et peu nombreuses.

Les principales causes de cet insuccès industriel sont au nombre de deux. En premier lieu, le système préconisé par M. Marcel Deprez, extension des expériences faites dès 1875 par M. H. Fontaine à l'Exposition de Vienne, permettait bien le transport de l'énergie électrique, mais il n'était que très imparfaitement approprié à la distribution, ce qui en limitait considérablement les applications possibles. En second lieu, la construction des machines à courant continu et à grande force électromotrice présentait des difficultés considérables, si considérables que pour produire 5000 volts, chiffre qui n'a jamais été dépassé dans une expérience de quelque durée, ou dans une installation industrielle, M. Marcel Deprez employait deux anneaux montés en tension, et fournissant 1500 volts chacun. Depuis, M. Billairet est parvenu à obtenir 5000 volts avec un seul anneau, mais c'est le chiffre maximum que nous puissions citer avec les courants continus.

Les courants alternatifs et les transformateurs ont complètement transformé la question en permettant

la production facile de tensions élevées, et la transformation plus facile encore de ces courants à l'aide d'appareils inerts, ne comportant aucune pièce mobile, permettant ainsi le *transport* et la *distribution* de l'énergie électrique avec des potentiels initiaux variant, en pratique industrielle, entre 1000 volts (Westinghouse en Amérique) et 10 000 volts (Ferranti à Londres), facilement transformés à l'arrivée à 100 volts, 65 volts ou 50 volts.

Mais la distribution de l'énergie électrique par courants alternatifs simples soulevait d'autres objections.

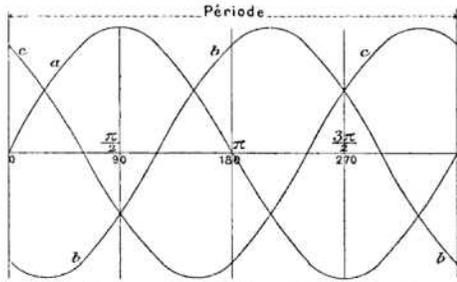


Fig. 1. — Diagramme montrant l'intensité du courant à chaque instant dans chacun des trois circuits *a, b, c*. (La somme algébrique de ces trois courants est toujours égale à zéro.)

Ces courants ne se prêtaient pas du tout à l'emmagasinement de l'énergie électrique et à la production de la force motrice. De nombreuses recherches ont été faites dans le but de réaliser un moteur à courants alternatifs présentant les mêmes qualités que les moteurs à courant continu, dans le but de réduire à néant l'objection que nous venons de signaler.

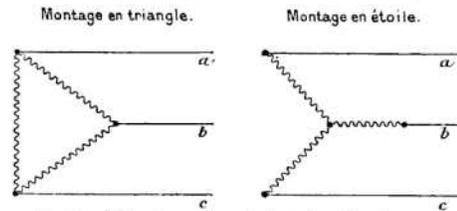


Fig. 2. — Modes de couplage des trois circuits entre eux et avec les trois lignes *a, b, c*.

L'étude de ces appareils nous entrainerait trop loin. Qu'il nous suffise de dire que, jusqu'à ces derniers temps, aucun de ces moteurs ne remplissait toutes les conditions exigées par l'application industrielle. Les récentes recherches de M. Tesla en Amérique, de MM. Hutin et Leblanc en France, laissent entrevoir la possibilité d'un moteur à courants alternatifs *simples* présentant toutes les qualités requises par la généralité des applications, c'est-à-dire pouvant démarrer sous charge, et tourner à une vitesse angulaire quelconque, indépendante de celle de la machine génératrice, dans des conditions de rendement satisfaisantes.

Mais pendant que ces recherches se poursuivaient, une solution nouvelle et originale est venue ouvrir une voie différente aux recherches et aux travaux : Les courants alternatifs à phases multiples ou *cou-*

rants alternatifs polyphasés offrent actuellement la solution la plus générale et la plus complète du transport de l'énergie électrique à grande distance en faisant emploi de courants de faible intensité et de force électromotrice élevée, de la transformation de ces courants, de leur subdivision indéfinie, et de leur distribution, en vue de toutes les applications industrielles : éclairage, force motrice, charge des accumulateurs, opérations électrochimiques, etc.

On peut considérer les courants alternatifs polyphasés comme le dernier avatar *actuel* de l'énergie électrique aspirant au rôle de panacée pour toutes les applications industrielles dont elle est aujourd'hui capable.

Nous étudierons donc successivement les générateurs, les transformateurs et les moteurs à courants polyphasés, en prenant comme exemple les expériences de Lauffen-Francfort. Il nous sera plus facile, après avoir décrit le système, d'exposer les raisons qui en justifient l'emploi.

Les appareils qui permettent la transformation facile des courants alternatifs polyphasés en courants continus propres à la charge des accumulateurs et aux opérations électrochimiques feront l'objet d'un article spécial.

Définition des courants polyphasés. — On sait qu'un courant alternatif ordinaire ou simple peut être représenté en fonction de temps par une courbe sinusoïdale, et caractérisé par son intensité efficace et sa fréquence. Considérons deux courants semblables passant identiquement aux mêmes instants par leurs valeurs nulles et leurs valeurs maxima, on dit que ces deux courants ont même période et même phase. Si ces deux courants, tout en conservant la même période, passent par des valeurs nulles et des valeurs maxima à des instants différents, on dit que ces courants sont *déphasés* ou *décalés*. A un instant donné, chacun des courants a une phase différente de celle de l'autre courant, et l'on a deux phases différentes à considérer, ce qui justifie le nom de *courants diphasés* donné à l'ensemble de ces deux courants. Généralement, dans le cas de deux courants, le décalage est, par construction, sensiblement égal à un quart de période; si le décalage était égal à une demi-période, les courants alternatifs seraient *en opposition*. Les courants alternatifs décalés de un quart de période combinés entre eux dans des appareils appropriés jouissent de propriétés spéciales qui justifient leur emploi, propriétés que nous examinerons à propos des moteurs à courants polyphasés. Dans le cas de trois courants décalés l'un par rapport à l'autre de un tiers de période, on a des *courants triphasés*; en combinant les actions de ces courants dans des appareils appropriés on peut construire des moteurs à courants alternatifs triphasés.

Mais les courants à trois phases ainsi décalés de un tiers de période, présentent sur les courants à deux phases l'avantage de la symétrie des conducteurs et de leur égalité de section. Dans le courant à deux phases, il faut employer quatre fils, ou trois

fil seulement, dont un plus gros servant de retour commun aux deux autres. Avec les courants triphasés, on voit facilement sur la figure 1 que la somme des trois courants traversant chacun des fils est toujours nulle, chaque fil sert de retour à la somme des courants traversant les deux autres; par suite les trois fils sont d'égale section.

D'après ce que nous venons de dire, un générateur à courants alternatifs polyphasés n'est donc pas essentiellement différent d'un générateur à courants alternatifs ordinaires. Il se compose, en principe, d'un système inducteur commun et de trois circuits induits décalés l'un par rapport à l'autre de un tiers de période, de façon à engendrer trois forces électromotrices passant successivement par leurs maxima à des intervalles de temps séparés de un tiers de période. Ces trois enroulements que nous représenterons par trois zigzags distincts (fig. 2) peuvent être couplés de deux façons : en circuit fermé ou en *triangle*, en circuit ouvert ou en *étoile*. Ces deux couplages modifient les forces électromotrices et la résistance intérieure du générateur, mais ne changent rien d'essentiel au système. Dans ce qui va suivre, nous supposons toujours les trois bobines couplées en *étoile*, comme dans les expériences de Lauffen-Franclort.

Générateur à trois phases.

— La dynamo à trois courants établie à Lauffen a été étudiée et construite par M. Brown, ingénieur des ateliers d'Oerlikon, près de Zurich. Elle est constituée par un système d'inducteurs mobiles et un induit fixe. Le système inducteur porte trente-deux pôles alternativement de noms contraires montés sur un axe

commun et excités par une bobine unique recevant le courant d'une petite excitatrice séparée à l'aide de deux cordelettes en tresse de laiton que l'on peut

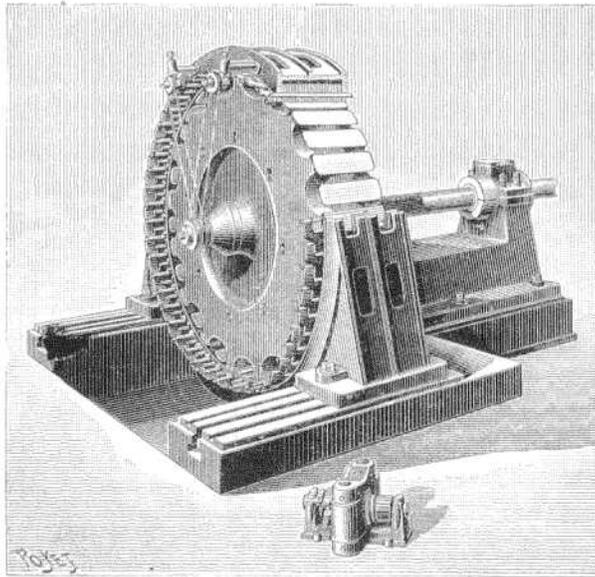


Fig. 3. — Dynamo génératrice à courants alternatifs triphasés.

voir sur la gauche de la figure 3 au-dessus de l'arbre. Cet inducteur tourne à l'intérieur d'un anneau cylindrique en tôle de fer doux, solidement maintenu sur le bâti en fonte. A la partie intérieure de cet anneau de fer doux sont ménagés quatre-vingt-seize trous parallèles à l'axe dans lesquels sont logés les conducteurs induits dont le diamètre atteint 29 millimètres. Ces barres conductrices sont isolées dans leurs trous respectifs à l'aide

d'une enveloppe d'amiante. Ces quatre-vingt-seize barres sont couplées entre elles par leurs extrémités et forment un enroulement en zigzag, chacun des enroulements comportant trente-deux barres en tension. L'une des extrémités de chaque enroulement communique avec un fil distinct relié au transformateur, les trois autres extrémités sont reliées à un quatrième fil et au transformateur, formant ainsi une sorte de retour commun ou fil neutre. La machine est étudiée pour fournir normalement 50 volts et 1400 ampères dans chaque circuit, ce qui correspond à une puissance utile d'environ 200 kilowatts. Les dispositions du circuit magnétique sont telles que les inducteurs ne portent que 500 kilogrammes de cuivre, chiffre absolument insignifiant eu égard à la puissance de la machine.

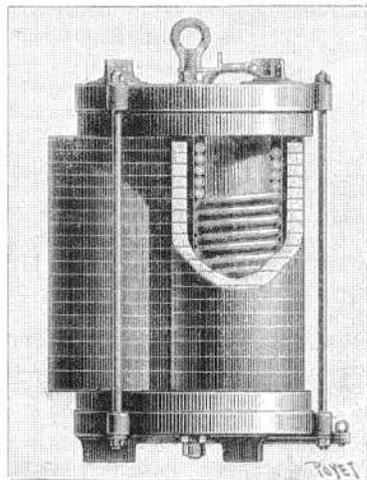


Fig. 4. — Transformateur à courants alternatifs triphasés.

L'excitation, lorsque l'induit est à circuit ouvert, ne dépasse pas 100 watts, chiffre à peu près doublé à pleine charge, à cause de la réaction d'induit. D'après M. Brown, le rendement industriel à pleine charge atteindrait 96 pour 100. Le

pois total de la machine ne dépasse pas 9000 kilogrammes et sa vitesse angulaire 150 tours par minute, ce qui correspond à une fréquence de 40 périodes par seconde.

Transformateurs. — Les courants triphasés résultant des forces électromotrices développées dans le générateur, sont envoyés dans un transformateur isolé au pétrole, dans le but de résister aux tensions élevées produites dans la transformation, tensions qui atteignent actuellement 15 000 volts, et seront ultérieurement portées à 15 000, 20 000, 25 000 volts, et même davantage, en faisant usage de deux transformateurs dont les

circuits inducteurs seront montés en dérivation et les circuits induits en tension, en vue d'éprouver la résistance des appareils et de la ligne aux tensions élevées, et les limites pratiques imposées par les isolants dont dispose aujourd'hui l'industrie.

Les transformateurs, identiques au départ et à l'arrivée, ont été construits, les uns par M. Brown dans les ateliers d'Oerlikon, les autres à Berlin, dans les ateliers de l'*Allgemeine Electricität's Gesellschaft*, sous la direction de M. Dolivo-Dobrowolsky. Le transformateur proprement dit, en dehors du récipient d'huile dans lequel il est entièrement plongé, se compose (fig. 4) de trois noyaux cylindriques for-

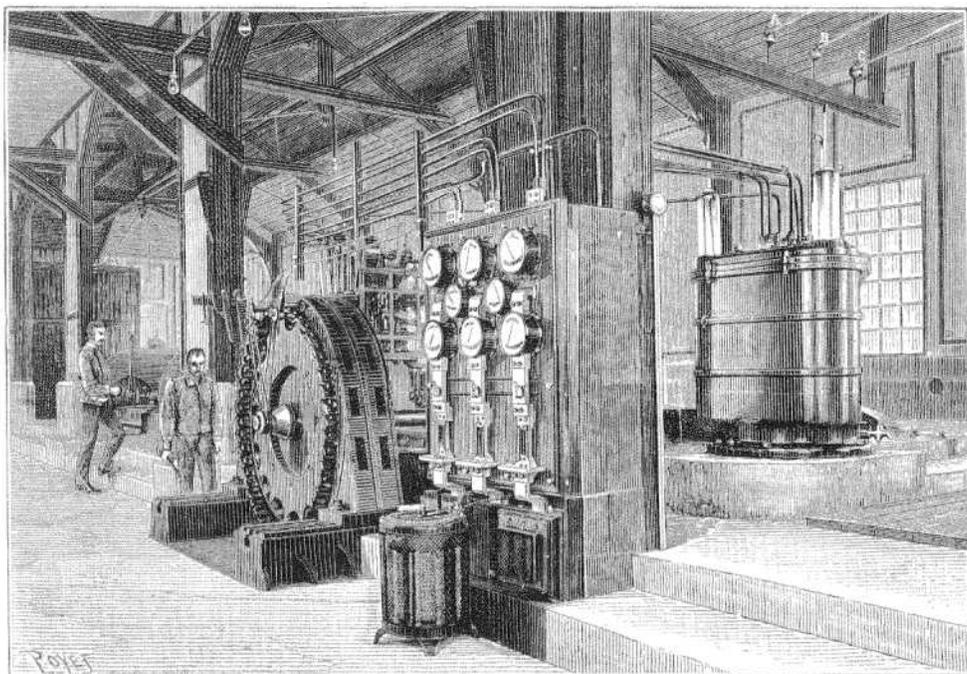


Fig. 5. — Ensemble de l'usine génératrice de Lauffen. — Dynamo à basse tension. Tableau de distribution. Transformateur et ligne à trois fils A B C. (D'après une photographie.)

més de lames minces de fer doux, et de deux disques en fer doux qui réunissent magnétiquement leurs extrémités, le disque inférieur formant en quelque sorte le socle et le disque supérieur le couvercle des trois noyaux. Sur chacun de ces trois noyaux sont disposés deux enroulements : l'un à gros fil, commun avec la machine, l'autre à fil fin, avec la ligne et la canalisation à haute tension. Les enroulements correspondent à un rapport de transformation de 160, c'est-à-dire qu'en fournissant 50 volts aux bornes de l'une des trois bobines du primaire, on obtient environ 8000 volts aux bornes du circuit secondaire correspondant, ce qui, avec le montage en étoile, représente près de 14 000 volts comme différence de potentiel efficace entre deux quelconques des trois fils de ligne. Les fils primaires et les

fils secondaires du transformateur sont connectés entre eux comme les trois fils de la génératrice, c'est-à-dire qu'ils ont un point commun, les trois autres extrémités communiquant respectivement, pour le gros fil à la dynamo génératrice, pour le fil fin aux trois fils de ligne ou de transport. Les trois milieux des étoiles communiquent métalliquement entre eux et avec la terre. Ce point est des plus importants, car grâce à cette disposition, que nous retrouverons d'ailleurs à l'arrivée, le danger de manipulation des appareils se trouve réduit à un minimum ; il est confiné exclusivement aux points de communication des fils fins des transformateurs avec les fils de ligne, et à la ligne elle-même. Aussi toutes les précautions ont-elles été prises pour mettre ces points dangereux hors d'atteinte. Les fils à haute