

*Bibliothèque numérique*

**medic @**

**Mourlot, Auguste. - Courants polyphasés et leurs applications. Thèse présentée au concours d'agrégation (Section de physique, chimie et toxicologie).**

**1904.**

**Paris : Gauthier-Villars**

**Cote : P30908**

ÉCOLE SUPÉRIEURE DE PHARMACIE DE PARIS.

230908  
(1904) 8

# THÈSE

PRÉSENTÉE AU

## CONCOURS D'AGRÉGATION

DU 1<sup>ER</sup> FÉVRIER 1904

(SECTION DE PHYSIQUE, CHIMIE ET TOXICOLOGIE).

### COURANTS POLYPHASÉS ET LEURS APPLICATIONS,

PAR M. AUGUSTE MOURLOT,

Docteur es Sciences,

Licencié es Sciences mathématiques et physiques, Pharmacien de première classe,  
Préparateur près l'École supérieure de Pharmacie.

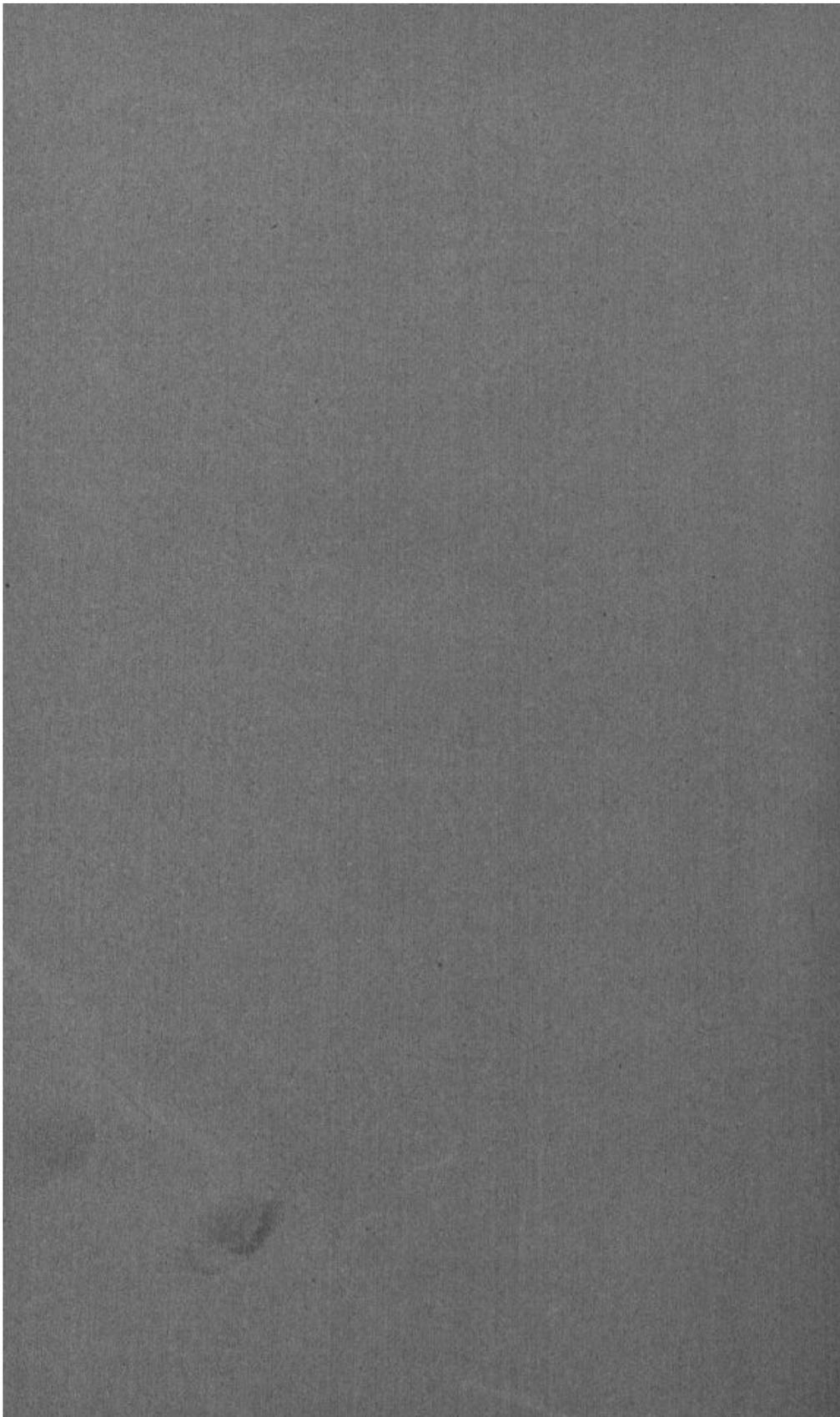


PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,  
Quai des Grands-Augustins, 55.

1904



ÉCOLE SUPÉRIEURE DE PHARMACIE DE PARIS.

---

# THÈSE

PRÉSENTÉE AU

## CONCOURS D'AGRÉGATION

DU 1<sup>er</sup> FÉVRIER 1904

(SECTION DE PHYSIQUE, CHIMIE ET TOXICOLOGIE).

---

### COURANTS POLYPHASÉS ET LEURS APPLICATIONS,

PAR M. AUGUSTE MOURLOT,

Docteur ès Sciences,  
Licencié ès Sciences mathématiques et physiques, Pharmacien de première classe,  
Préparateur près l'École supérieure de Pharmacie.



PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Grands-Augustins, 55.

—  
1904

**JURY.**

MM. MOISSAN, *Président.*  
JUNGFLEISCH.  
BOUCHARDAT.  
GAUTIER.  
BERTHELOT.  
MASSOL.  
FAVEREL.

---

**JUGES SUPPLÉANTS.**

MM. VILLIERS-MORIAMÉ.  
OUVRARD.  
LEBEAU.  
MOUREAU.

---

**SECRETÉAIRE.**

M.

---

**CANDIDATS.**

MM. BOUGAULT.  
COUSIN.  
DEFACQZ.  
DELÉPINE.  
FRANÇOIS.  
GIRARDET.  
GUERBET.  
MOURLOT.  
TASSILLY.  
TARBOURIECH.  
VALEUR.

---

---

## PRÉFACE.

---

L'histoire des courants alternatifs et polyphasés, ainsi que de leurs applications, constitue une belle page dans la suite des efforts faits par les savants pour arriver au transport de l'*Énergie* et faire de l'*Électricité* la meilleure des forces motrices.

Plus d'un demi-siècle de constants efforts ont été, en effet, nécessaires pour obtenir les beaux résultats que nous constatons aujourd'hui; nous résumerons rapidement les principaux travaux faits sur cette question.

En 1839, JACOBI réussit à mettre en mouvement un bateau sur la Néva; son appareil moteur consistait en un certain nombre d'électroaimants s'attirant les uns les autres par leurs pôles de nom contraire et se repoussant par leurs pôles de même nom. L'appareil ainsi constitué avait à peine la force d'un cheval-vapeur et l'expérience était peu encourageante; on sait aujourd'hui qu'il ne pouvait en être autrement. Aussi faut-il regretter les efforts considérables que fit GUSTAVE FROMENT pour arriver à résoudre une question insoluble dans cette voie; le grand électromoteur de Froment (1850), ne dépassait pas en force un quart de cheval.

Signalons également le petit moteur électromagnétique de TROUVÉ (1870), à très peu près identique, et résumons-nous en disant que tous ces appareils, fondés, soit sur la force attractive des électroaimants, soit sur les actions réciproques électromagnétiques, ne sont que des moteurs inutilisables industriellement.

Ce fut à l'Exposition de Vienne (1873) que H. FONTAINE eut l'idée heureuse de réunir entre elles deux machines Gramme et put

constater que le courant électrique produit par l'une d'elles mettait la seconde en mouvement.

La voie exacte était trouvée, mais la question n'était pas encore complètement résolue; c'est que, en effet, dès que la distance des deux machines Gramme devenait égale à quelques centaines de mètres, le *rendement* devenait insignifiant.

Il fallait donc triompher de la résistance du conducteur et ce fut M. MARCEL DEPRez qui en trouva le moyen; avec des machines dynamo-électriques transformées selon ses idées, ce savant put en effet obtenir, d'abord à l'Exposition de Munich en 1882, puis dans les ateliers du Chemin de fer du Nord (mars 1883), des rendements s'élevant jusqu'à 48 pour 100 et ce, sur des distances variables entre 17<sup>km</sup> et 57<sup>km</sup>.

L'idée géniale de M. Marcel Deprez consistait à employer l'électricité à haute tension à la station génératrice; mais, pour donner cette propriété à un courant continu, il faut des appareils coûteux de transformation.

Au contraire, le *courant alternatif* se prête à toute transformation élevant ou abaissant sa force électromotrice ou son intensité. De même, les courants polyphasés se prêtent, comme les courants alternatifs simples, dont ils sont une combinaison, au transport de l'énergie électrique à grande distance, ce qu'il était impossible d'obtenir par le courant continu; ils ont de plus, sur le courant alternatif simple, l'avantage de permettre une très grande économie dans les lignes de transmission et de fournir une énergie constante. Convenant également pour l'éclairage, leur supériorité incontestable, et sur les courants continus et sur les courants alternatifs simples, réside dans la possibilité d'en obtenir des moteurs, démarrant sous forte charge, dont le rendement peut être très élevé, qui ont sur tous les autres moteurs des qualités supérieures de stabilité et dont le principal avantage réside dans la suppression du collecteur, dont l'usure est très rapide pour les moteurs à courant continu. En ce qui concerne l'électrolyse et la charge des accumulateurs, des appareils très simples (redres-

seurs ou convertisseurs) en permettent l'emploi, même à une grande distance de leurs génératrices.

Ces dernières pourront d'ailleurs être actionnées directement par une source naturelle d'énergie, telle qu'une chute d'eau, et cette énergie, transmise à une grande distance par courants polyphasés, pourra être utilisée soit directement par les redresseurs, soit indirectement au moyen des transformateurs divers. C'est ainsi qu'est entrée dans la pratique l'utilisation des chutes du Niagara, permettant de distribuer une puissance de 450 000 chevaux à des distances pouvant atteindre 100<sup>km</sup>.

Si nous ajoutons que l'on peut construire des moteurs polyphasés d'une puissance de 5000 chevaux et que la traction polyphasée a permis d'atteindre des vitesses de 160<sup>km</sup> à l'heure, nous comprendrons toute l'importance de l'énergie polyphasée.

Toute cette œuvre magistrale que nous venons d'esquisser rapidement, annoncée par les précurseurs tels que Marcel Deprez, a été accomplie dans les quinze dernières années du XIX<sup>e</sup> siècle.

Tout d'abord, c'est GALILEO-FERRARIS qui, en mars 1888, dans une Communication qu'il fit à l'Académie de Turin, donne la description du premier moteur asynchrone biphasé; puis c'est TESLA qui retrouve, en octobre 1888, les résultats de Ferraris, les perfectionne, indique les premiers dispositifs de démarrage et donne par le stator multipolaire un moyen commode de la réduction de vitesse.

La voie ouverte par ces deux grands esprits fut rapidement parcourue; citons entre autres :

HALSELWANDER, BRADLEY, WILSON, BOREL construisant des moteurs spéciaux polyphasés;

M. VON DOLIWO DOBROWOLSKY, à qui l'on doit le fer tournant des générateurs polyphasés ainsi que la cage d'écureuil, organe mobile ou rotor des moteurs asynchrones (1889);

M. BROWN, de la maison Brown, Boveri et C<sup>ie</sup>, à qui l'on doit tant de recherches intéressantes sur le bobinage des induits et qui créa pour ainsi dire de toutes pièces la traction polyphasée;

MM. SCHUCKERT, LALMEYER, S.-P. THOMPSON, JANET, RODET, STEINMETZ, BOUCHEROT et un certain nombre d'autres savants, qui apportèrent chacun leur note personnelle au grand œuvre, actuellement achevé, des courants polyphasés.

Pour exposer, sans rien omettre, tout ce qui concerne cette importante question, nous devrions dépasser le cadre que nous nous sommes assigné et qui nous a forcément limité.

Aussi, en écrivant cette Thèse (1), nous avons voulu tout d'abord répondre au programme donné, aussi élémentairement que possible, d'où nos six premiers Chapitres.

Dans le Chapitre I, nous exposons les généralités susceptibles de faire comprendre la production et l'utilisation des courants polyphasés.

Le Chapitre II indiquera les constantes de tout courant alternatif et la mesure de l'énergie alternative.

Les générateurs polyphasés seront traités dans le Chapitre III; les moteurs dans le Chapitre IV; les transformateurs dans le Chapitre V.

Enfin, dans le Chapitre VI, nous exposons quelques idées générales sur les transports de force, l'éclairage et la traction polyphasés.

La théorie élémentaire étant ainsi exposée, il nous a paru nécessaire d'y adjoindre, dans le Chapitre VII, les théories physiques de l'induction, afin de donner une explication rigoureuse et complète du mécanisme et de l'utilisation des courants polyphasés.

Nous espérons que la lecture de ces quelques Chapitres aidera le lecteur dans une étude plus complète qu'il pourra faire dans les livres techniques appropriés.

A. MOURLOT.

---

(1) Nous remercions bien vivement M. Gauthier-Villars des clichés qu'il a bien voulu mettre à notre disposition.



# COURANTS POLYPHASÉS

ET

## LEURS APPLICATIONS.



### CHAPITRE I.

COURANT MONOPHASÉ OU ALTERNATIF. DÉFINITION DE LA PHASE.  
DÉFINITION DES COURANTS POLYPHASÉS. NOTIONS GÉNÉRALES  
SUR LEURS APPLICATIONS.

De nombreuses expériences permettent de différencier le courant continu du courant alternatif. Nous décrirons la suivante qui nous paraît susceptible de définir la phase d'un courant alternatif et nous donnera par suite la notion des courants polyphasés.

#### Expérience fondamentale ou du cadre tournant.

Entre les deux pôles N et S d'un aimant, plaçons une bobine de fils conducteurs dont les extrémités s'appuient à frottement dur sur deux bagues circulaires *a* et *b*.

Faisons tourner cette bobine autour de la verticale après avoir relié métalliquement les bagues aux bornes d'un galvanomètre sensible.

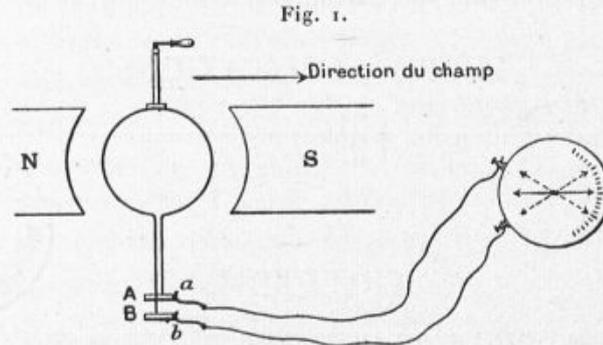
Ayant placé au départ le cadre normalement à la direction du champ indiquée par la flèche, examinons la déviation de l'aiguille indicatrice du courant produit.

Nous constaterons que la déviation de l'aiguille tout d'abord nulle croîtra dans un certain sens, deviendra maximum pour une rotation du cadre égale à  $90^\circ$ , puis décroîtra pour être de nouveau nulle lorsque le cadre aura tourné de  $180^\circ$ . La rotation continuant, on verra l'ai-

M.

1

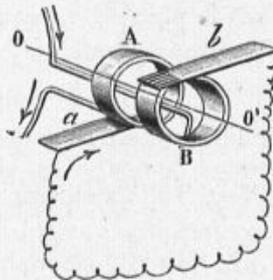
guille déviée dans un autre sens et les alternatives de la première demi-rotation se répéteront.



*Note :* Pour une rotation complète du cadre mobile l'aiguille oscille d'angles égaux de part et d'autre de sa position d'équilibre; les bagues A et B et les frotteurs *a* et *b* sont représentés figure 1 bis.

Si nous rappelons que la direction d'un courant est définie par le

Fig. 1 bis.



Perspective des bagues fixes.

sens de la déviation de l'aiguille galvanométrique, nous pouvons tirer de cette expérience les conclusions suivantes :

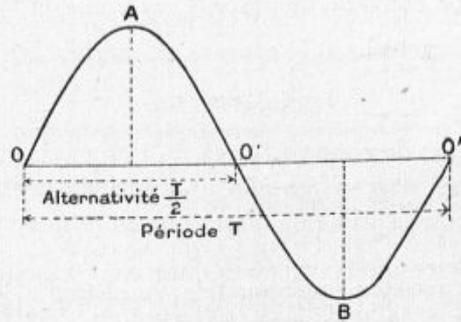
1° *Le courant d'induction produit par la rotation du cadre a une certaine direction lorsque le cadre tourne de  $0^\circ$  à  $180^\circ$ , change de sens à  $180^\circ$  pour une direction contraire qu'il conserve jusqu'à la rotation complète;*

2° *Ce courant passe par des valeurs maxima lorsque le plan du cadre est parallèle à la direction du champ.*

Un pareil courant est appelé *alternatif* et, afin de se rendre mieux compte des diverses particularités qu'il présente, il est rationnel de chercher à le représenter soit par un graphique, soit par une formule appropriée.

*Construction graphique.* — Les deux variables de l'expérience étant le temps et l'intensité. Rapportons le graphique à deux axes de coordonnées rectangulaires et portons, en abscisses les temps, en

Fig. 2.



ordonnées les intensités. Nous obtenons pour une rotation complète la courbe indiquée par la figure 2.

Quelques définitions en découlent de suite et sont nécessaires parce que constamment employées :

- α. Le temps  $T$ , figuré par  $oo''$ , d'une rotation complète s'appelle *période*.
- β. La moitié de la période, soit  $\frac{T}{2}$ , est appelée *alternativité*.
- γ. L'inverse de la période, soit  $\frac{1}{T}$ , constitue la *fréquence*.
- δ. Le double de la fréquence, soit  $\frac{2}{T}$ , est l'*alternance*.
- ε. La vitesse angulaire de rotation du cadre, soit  $\frac{2\pi}{T}$ , se nomme la *pulsation du courant*.

*Formule du courant alternatif.* — Cette formule constitue l'équation même de la courbe précédente; or, cette courbe se rapproche beaucoup d'une sinusoïde. En conséquence, nous obtenons

comme valeur de l'intensité du courant à l'époque  $t$ , l'origine des temps étant le moment du départ de la rotation du cadre tournant, l'expression

$$I = I_{\max.} \sin 2\pi \frac{t}{T},$$

dans laquelle  $T$  est la durée d'une rotation complète ou période.

On retrouvera, en faisant dans cette formule  $t = 0$ ,  $t = \frac{T}{4}$ ,  $t = \frac{T}{2}$ , ..., les valeurs de l'intensité indiquées par la courbe.

Pour abrégé, on convient de poser  $\frac{2\pi}{T} = \omega$  et l'on a, en définitive, comme formule caractérisant le courant alternatif,

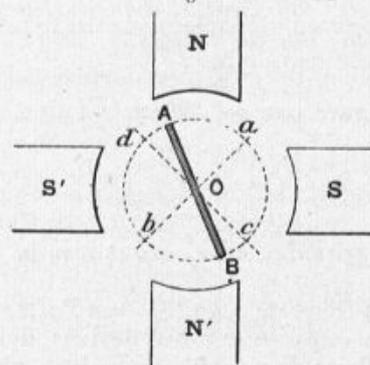
$$I = I_{\max.} \sin \omega t,$$

où  $\omega$  est la pulsation du courant.

Le courant ainsi obtenu possède une période par tour du cadre mobile, ce que l'on exprime en disant que sa fréquence est égale au nombre de tours.

Mais, dans l'expérience fondamentale, le champ a été produit par deux pôles N et S et l'inversion avait lieu lorsque le cadre était normal au champ; si donc nous remplaçons les deux pôles précédents

Fig. 3.



Cadre tournant dans un champ tétrapolaire.

par un système de quatre pôles alternés distant angulairement de  $90^\circ$  et entourant le cadre mobile, nous aurons pour une rotation complète deux inversions et par suite deux maximums pour des positions rectangulaires du cadre; ce que l'expérience vérifie.

Nous donnons, figure 3, la coupe, normale à l'axe de rotation, d'un tel dispositif.

La fréquence du courant alternatif est alors doublée et correspond à deux périodes par tour.

La généralisation est évidente et au moyen de  $p$  paires de pôles le courant sinusoïdal obtenu sera caractérisé par  $p$  périodes en un tour.

Il est d'ailleurs évident que dans ces expériences de rotation d'un cadre toutes les conclusions précédentes resteront exactes alors même que l'axe de rotation ne coïncidera pas avec un diamètre ou une ligne de symétrie du cadre.

En conséquence, si une spire circulaire tourne dans un champ bipolaire de manière à venir occuper les positions 1, 2, 3, 4 qu'indique

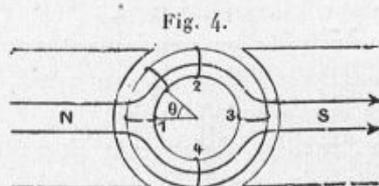


Fig. 4.  
Spire tournant dans un champ bipolaire.

la figure 4, nous sommes en droit de déduire de notre expérience fondamentale les conclusions suivantes :

1° La spire dont les extrémités aboutissent à un circuit extérieur sera parcourue par un courant alternatif, nul pour les positions 2 et 4, maximum pour les positions 1 et 3.

2° L'inversion ayant lieu suivant la ligne 2, 4, il s'ensuit que le courant alternatif a des sens différents de part et d'autre de cette ligne et une période par tour.

3° Si la spire tourne dans un champ constitué par  $p$  paires de pôles le nombre de périodes sera égal à  $p$  pour un tour complet.

On déduit de cette dernière conclusion que, si le nombre de tours est égal à  $N$  par seconde, le nombre de périodes sera  $Np$  : c'est la fréquence.

Pratiquement on dépasse rarement 50 périodes par seconde; toutefois, dans les appareils dits *alternateurs de haute fréquence*, on arrive à 2000 ou 3000 périodes à la seconde.

Enfin Hertz put obtenir en 1888, par un procédé particulier, jusqu'à 1 milliard de périodes par seconde.

*Actions physiques différentielles entre le courant alternatif et le courant continu.* — Il nous paraît utile de montrer qu'aux différences graphiques ou symboliques précédentes correspondent des différences d'action entre le courant continu et le courant alternatif.

Nous allons rapidement examiner quelques-uns des phénomènes susceptibles de nous montrer nettement, et les différences et parfois les analogies entre ces deux sortes de courants.

*Actions calorifiques et lumineuses.* — Lorsqu'un courant alternatif parcourt une résistance, on ne tarde pas à voir le fil s'échauffer et rougir; l'expérience se fait facilement au moyen d'une spirale de platine ou d'une lampe à incandescence.

On s'explique ce résultat en remarquant que la chaleur dégagée est à chaque instant proportionnelle au carré de l'intensité et ne change donc pas de sens avec le courant.

Mais le carré de l'intensité du courant alternatif est variable pendant une période; en sorte que la lumière émise par la lampe oscillera dans l'intervalle de cette période. Toutefois, par suite de la persistance des impressions lumineuses sur la rétine, dès que la période sera très faible ou, ce qui est identique, dès que le nombre des alternances sera considérable, on obtiendra un éclat lumineux sensiblement constant.

Le résultat sera le même pour les lampes à arcs; dans ce cas, le nombre des alternances doit être au moins de 50 par seconde, si l'on veut empêcher l'oscillation de la lumière; signalons que dans ce cas l'usure des charbons sera évidemment la même, contrairement à ce qui se passe en courant continu.

*Actions électriques.* — Toutes ces actions s'expliquent facilement par le caractère oscillatoire du courant.

Si, par exemple, nous répétons l'expérience d'OErstedt avec un courant alternatif, deux cas pourront se présenter :

Ou bien le nombre d'alternances est considérable et, dans ce cas, on n'observera aucune déviation de l'aiguille, bien qu'elle vibre rapidement;

Ou, le contraire ayant lieu, on verra la déviation de l'aiguille changer de sens à chaque interversion du courant.

Si l'on cherche à produire l'aimantation d'un noyau de fer doux par un courant alternatif, le plus souvent l'aimantation se produit, mais elle est due uniquement au retard qu'apporte le fer doux à sa désaimantation, c'est-à-dire à l'hystérésis.

Dès que le nombre d'alternances peut s'élever à 2 000 ou 3 000, il n'y a pas trace d'aimantation.

Une conclusion analogue a lieu en ce qui concerne l'électrolyse; avec des alternances aussi considérables que les précédentes il n'y a pas trace de décomposition; avec des alternances comprises dans des nombres inférieurs on obtient les ions de l'électrolyte en quantité égale et à chaque électrode.

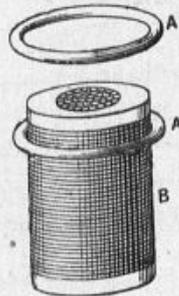
On en conclut que le courant alternatif sera inutilisable dans l'électrolyse, pour la galvanoplastie et pour la charge des accumulateurs.

Enfin, toutes les expériences classiques concernant l'attraction ou la répulsion de deux courants parallèles pourront se répéter avec les mêmes appareils que pour le courant continu, car l'attraction ou la répulsion exercée ne dépend que du sens des courants.

*Actions inductives.* — Ce dernier genre de phénomènes est remarquable, car il permet, grâce à une expérience due à Elihu Thompson, de différencier nettement le courant alternatif du courant continu.

Devant une bobine, munie intérieurement d'un paquet de fils ou de

Fig. 5.



Répulsion d'un anneau métallique par une bobine à courant alternatif.

tôles minces, et parcourue par un courant alternatif, plaçons un anneau métallique : nous verrons cet anneau repoussé à une certaine hauteur, s'y maintenir et s'échauffer d'une manière appréciable (*fig. 5*).

### Définition de la phase.

Imaginons que, dans l'expérience fondamentale du cadre tournant, nous ayons branché sur le même axe vertical de rotation deux cerceaux identiques perpendiculaires et dont les enroulements aboutissent chacun à deux bagues isolées.

Relions chaque paire de bagues aux bornes respectives de deux galvanomètres identiques et donnons au système un mouvement de rotation uniforme, nous pourrions constater que :

*Le courant sinusoïdal produit dans l'un des cadres passe par une valeur nulle quand le courant produit dans l'autre est maximum et par une valeur maximum quand le deuxième courant est nul.*

L'intervalle de temps séparant la valeur nulle de l'un des courants et la valeur maximum de l'autre est d'ailleurs le temps nécessaire pour que l'un des cadres tournants prenne dans la rotation la place de l'autre, c'est-à-dire le quart de la période commune.

Par définition, nous dirons que les deux courants sont décalés d'un quart de période ou que leur différence de phase est de  $\frac{\pi}{2}$ . Ainsi donc la différence de phase dans le cas de deux anneaux rectangulaires est égale à l'angle des plans de ces anneaux ; par suite, si l'on convient de prendre comme phase 0 celle de l'un d'eux, il en résulte que celle de l'autre sera  $\pm \frac{\pi}{2}$ , suivant que ce deuxième sera décalé en avance ou en retard sur le premier.

Nous avons ainsi créé un système de courants alternatifs *biphasés*, c'est-à-dire prenant des valeurs identiques mais à des instants différents entre eux d'un temps fixe égal au quart de la période commune.

Ils seront caractérisés soit par le graphique de la figure 6, soit par les formules

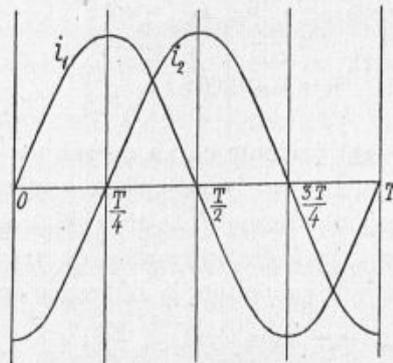
$$\begin{aligned} I_1 &= I_{\max} \sin \omega t, \\ I_2 &= -I_{\max} \cos \omega t. \end{aligned}$$

Répetons enfin l'expérience du cadre tournant en fixant sur le même axe de rotation trois cadres distants angulairement de  $120^\circ$  et, par suite, tels que leurs moitiés fassent entre elles des angles de  $60^\circ$ .

Après avoir relié les fils conducteurs de chacun d'eux à une paire

de bagues isolées, nous obtiendrons, dans les trois circuits extérieurs y aboutissant, trois courants alternatifs identiques pour la période,

Fig. 6.

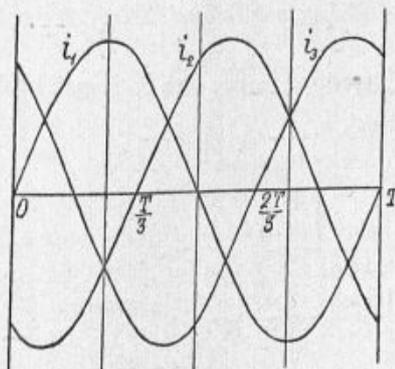


Courants biphases.

mais tels que les courants produits par deux cadres successifs soient égaux à des intervalles de temps séparés par un tiers de la période commune.

Les courants ainsi produits seront dits *décalés d'un tiers de*

Fig. 7.



Courants triphasés.

*période* ou *triphases*, ce dernier qualificatif voulant spécifier que, si la phase de l'un est prise comme zéro, celles des deux autres seront  $\frac{2\pi}{3}$  et  $\frac{4\pi}{3}$  en valeur absolue.

Nous pourrions représenter ces courants graphiquement par le schéma de la figure 7; algébriquement par les formules

$$I_1 = I_{\max} \sin \omega t,$$

$$I_2 = I_{\max} \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right),$$

$$I_3 = I_{\max} \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right).$$

La généralisation est évidente et, au moyen du dispositif consistant en  $n$  cadres branchés sur le même axe vertical de rotation, on obtiendrait des courants alternatifs se succédant mutuellement dans leurs valeurs respectives à des intervalles de temps séparés par la  $n^{\text{ème}}$  partie de la période commune; la différence de phase entre deux courants consécutifs est alors égale à  $\frac{2\pi}{n}$ : c'est l'angle des deux cadres correspondants.

#### Notions générales sur les propriétés des courants polyphasés.

La propriété fondamentale des courants polyphasés est celle qu'ils possèdent *de fournir un champ magnétique constant et tournant, autour d'une droite fixe appelée axe du champ tournant, avec une vitesse angulaire égale à la pulsation des courants polyphasés producteurs.*

Pour le montrer, prenons le cas des courants biphasés et dirigeons

Fig. 8.

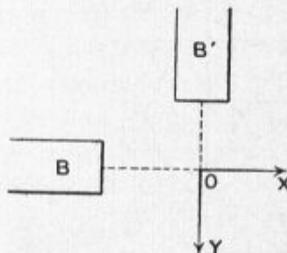
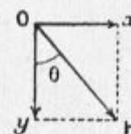


Fig. 8 bis.



ces courants dans deux bobines ou électro-aimants rectangulaires B et B' (*fig. 8*).

Cherchons quelle sera la valeur du champ créé par l'ensemble de ces deux bobines au point de rencontre de leurs axes que nous pla-

cerons à égale distance de chacune d'elles; il nous suffira de rappeler que l'action électromagnétique exercée par une bobine en un point fixe est proportionnelle à l'intensité du courant qui la parcourt, de telle sorte que si les deux bobines sont physiquement identiques, le champ de la première sera  $X = KI_1$ , et celui de la deuxième  $Y = KI_2$ .

Or, en supposant le courant  $I_2$  décalé en arrière sur le courant  $I_1$ , on aura

$$X = KI_{\max} \sin \omega t,$$

$$Y = -KI_{\max} \cos \omega t,$$

et, par suite, en désignant par  $H$  la valeur du champ résultant

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2} = KI_{\max}.$$

On voit que ce champ est constant comme nous l'avions annoncé. Quant à sa direction, elle sera déterminée par l'angle qu'il fait avec l'axe de l'une des bobines  $B'$  par exemple. Soit  $\theta$  cet angle, on aura la relation évidente

$$\text{tang } \theta = \frac{X}{Y} = \text{tang } \omega t,$$

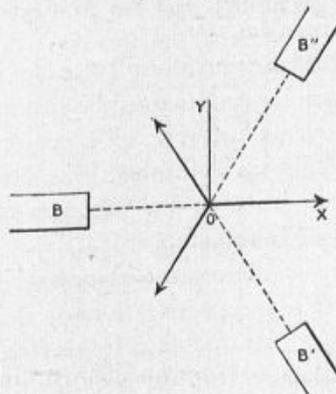
et, par suite,

$$\theta = \omega t,$$

ce qui démontre la formation uniforme de ce champ.

Pour le cas des courants triphasés à  $120^\circ$  on emploierait trois

Fig. 9.



bobines  $B, B', B''$  (fig. 9). En un point  $o$  équidistant de chacune d'elles, on obtiendrait trois champs et pour les composer il suffit de

les projeter sur deux axes rectangulaires, l'un d'eux coïncidant avec l'axe de l'une des bobines. Les composantes X, Y, situées dans le plan commun aux trois champs composants, seront

$$X = KI_1 + KI_2 \cos \frac{2\pi}{3} + KI_3 \cos \frac{4\pi}{3},$$

$$Y = KI_2 \sin \frac{2\pi}{3} + KI_3 \sin \frac{4\pi}{3}.$$

En remplaçant dans ces formules  $I_1, I_2, I_3$  par leurs valeurs, on trouve

$$X = \frac{3}{2} KI_{\max} \sin \omega t,$$

$$Y = -\frac{3}{2} KI_{\max} \cos \omega t.$$

Le champ résultant a donc pour valeur  $\frac{3}{2} KI_{\max}$  et sa vitesse angulaire de rotation est encore égale à la pulsation du courant,

Le résultat est donc le même que pour les courants biphasés; il n'en diffère que par l'intensité du champ résultant.

Pratiquement, au lieu de bobines distinctes, il est plus commode de placer trois enroulements sur un même anneau de fer doux, chacun d'eux étant parcouru par les courants décalés que nous pourrions supposer fournis jusqu'à présent par le dispositif du cadre tournant (*fig. 1*); l'anneau de fer doux introduit évidemment des modifications dans le champ résultant, mais pouvant être négligées dans une première approximation.

Si l'on recouvre cet anneau d'une lame de verre saupoudrée de limaille de fer, on verra les grains tourner autour du centre et l'expérience pourra, au moyen d'un appareil à projections verticales, être rendue visible pour tout un auditoire. Plus simplement, en plaçant au centre de l'anneau un œuf en aluminium, on verra cet œuf tourner rapidement sur lui-même.

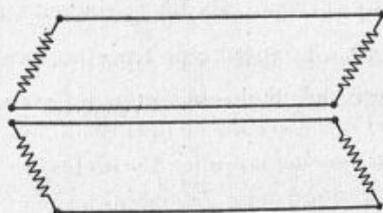
Plus généralement, si l'on place dans un champ tournant une pièce métallique quelconque mobile autour de l'axe du champ, ce conducteur se trouvera entraîné dans le sens même de la rotation du champ; on aura ainsi constitué un premier genre de moteur polyphasé, appelé par Galileo Ferraris (<sup>1</sup>), moteur *asynchrone*.

(<sup>1</sup>) G. FERRARIS, *Acc. delle Scienze di Torino*, t. XXIII, 1888.

Si, dans cette expérience, la pièce métallique est remplacée soit par un aimant, soit par un électro-aimant, le moteur prendra le nom de moteur *synchrone*. Nous étudions ces deux genres de moteur au Chapitre V. Et comme, d'ailleurs, les machines créatrices de courants polyphasés ou alternateurs polyphasés sont séparées des moteurs par une distance souvent considérable, il nous faut dire quelques mots sur la transmission de ces courants.

*Transmission des courants biphasés.* — Ces courants, produits comme nous l'avons précédemment indiqué, peuvent être lancés dans un double enroulement, ce qui nécessitera deux lignes par phase, soit en tout quatre lignes de transmission. On pourra aussi réunir les

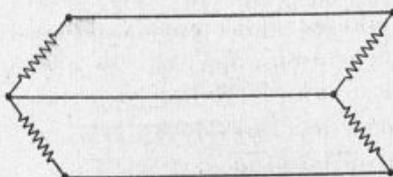
Fig. 10.



Système diphasé à 4 fils.

deux fils de retour en un seul, à la condition que la perte ohmique soit inférieure à celle de la disposition à quatre fils; or, ces pertes

Fig. 11.



Système diphasé à 3 fils.

sont proportionnelles aux intensités des courants et varient en raison inverse des sections des conducteurs.

Nous sommes donc amenés à calculer l'intensité du courant qui traverse le fil unique de retour; cette intensité sera

$$I = I_1 + I_2 = I_{\max}[\sin \omega t - \cos \omega t] = I_{\max} \sqrt{2} \sin[\omega t - 45^\circ].$$

L'intensité maximum de ce courant est donc  $\sqrt{2}$  fois plus grande que pour un seul fil; il faudra qu'il en soit de même pour sa section. Par suite, dans une transmission à quatre fils la section totale est  $4S$  et devient  $2S + \sqrt{2}S$  pour le cas de trois fils; il y aura donc gain en ce qui concerne la quantité de cuivre.

Ces deux modes de transmission pour courants biphasés seront représentés par les figures 10 et 11 dans lesquelles les lignes en zigzag caractéristiques de chaque phase sont rectangulaires.

*Transmission des courants triphasés.* — On peut employer deux fils pour chaque alternateur, ce qui nous fournirait une transmission dite à six fils.

En raisonnant comme pour le cas des courants biphasés on se trouve amené à réunir les trois fils de retour en un seul; l'intensité résultante y sera égale à la somme de trois courants décalés de  $\frac{2\pi}{3}$ , c'est-à-dire représentée algébriquement par l'expression

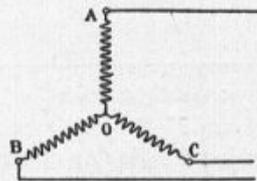
$$I_{\max} \left[ \sin \omega t + \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \right].$$

Or, la somme entre crochets est nulle; l'intensité dans le fil unique de retour sera donc égale à zéro.

On pourra donc supprimer ce fil de retour et, dans ce cas, l'une quelconque des lignes de transmission peut être considérée comme fil de retour; néanmoins, et surtout pour l'éclairage polyphasé, on conserve parfois ce fil de retour.

La disposition résultant de la suppression de trois des fils de

Fig. 12.



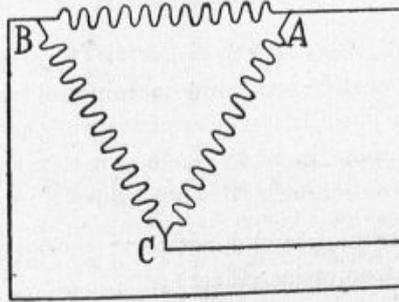
Montage en étoile.

transmission est alors représentée par la figure 12 dans laquelle les trois phases sont reliées à un même point neutre d'où elles partent

comme les trois branches d'une étoile, d'où le nom caractéristique de *montage en étoile*.

Mais il est possible de relier les phases entre elles de manière que le commencement de l'une coïncide avec la fin de l'autre : on obtient alors (*fig. 13*) le montage dit *en triangle*; nous étudions les avantages particuliers de ces diverses dispositions au Chapitre IV.

Fig. 13.



Montage en triangle.

Faisons enfin remarquer que les courants transmis seront reçus dans une réceptrice à trois enroulements montés également soit en étoile, soit en triangle.



---

## CHAPITRE II.

### ÉTUDE INTRINSÈQUE D'UN COURANT MONOPHASÉ.

---

Le courant alternatif simple ou monophasé est connu de nous jusqu'à présent par l'oscillation de son intensité; mais, d'autres grandeurs très usitées dans la pratique le caractérisent également. Ce sont :

- 1° La force électromotrice à l'instant  $t$ ;
- 2° La force électromotrice efficace;
- 3° L'intensité efficace;
- 4° Le facteur de puissance;
- 5° L'énergie.

Après avoir défini ces diverses caractéristiques et en avoir indiqué rapidement la mesure, nous les appliquerons à la détermination théorique et pratique de l'énergie en courants polyphasés.

#### Force électromotrice d'un courant alternatif.

Dans l'expérience fondamentale du cadre tournant (*fig. 1*) remplaçons le galvanomètre par un électromètre (l'électromètre de Lord Kelvin, perfectionné par M. Mascart de préférence), et comme dans le cas de l'expérience rappelée faisons tourner le cadre en ayant soin de le placer primitivement normal à la ligne des pôles.

Suivons les indications de l'aiguille mobile; nous verrons cette aiguille osciller et, de l'étude de ses oscillations, nous tirons facilement les conclusions suivantes :

*La force électromotrice d'induction produite est nulle au départ, maximum pour une rotation de  $90^\circ$ , nulle pour  $180^\circ$ , change de signe à ce moment, acquiert un maximum égal au*

premier pour  $270^\circ$ , enfin redevient nulle pour une rotation complète.

Ainsi donc la force électromotrice induite passe par les mêmes alternances et dans les mêmes conditions que le courant qu'elle pourrait produire.

C'est dire que nous pourrions la représenter par un graphique et une formule analogue

$$E = E_{\max} \sin \omega t,$$

dans laquelle  $E_{\max}$  représentera la valeur de la force électromotrice lorsque le cadre sera parallèle à la ligne des pôles. On dit alors que la force électromotrice et l'intensité du courant monophasé sont en concordance de phase.

Mais, pour qu'il en soit ainsi, il est nécessaire que le circuit dans lequel circule le courant soit dénué, et de self-induction, et de capacité. Sinon, il se produira entre ces deux grandeurs une différence de phase ou décalage variable avec la self-induction et la capacité du circuit extérieur (Chap. VII, p. 110).

En définitive, la force électromotrice et l'intensité d'un courant monophasé pourront être représentées par les expressions

$$\begin{aligned} E &= E_{\max} \sin \omega t, \\ I &= I_{\max} \sin(\omega t \pm \varphi), \end{aligned}$$

dans lesquelles l'angle de décalage  $\varphi$  dépend de la self-induction et de la capacité du circuit que le courant parcourt; cet angle étant affecté du signe  $\pm$  suivant que le décalage du courant par rapport à la force électromotrice est en avant ou en arrière. Les courbes caractérisant ces formules sont représentées dans la figure 14.

Toutes ces conclusions découlent de ce fait que la loi d'Ohm, qui régit les courants continus, ne s'applique plus dans le cas du courant alternatif. On a alors, au lieu et place de l'égalité d'Ohm :

$$\text{Force électromotrice} = \text{résistance} \times \text{intensité},$$

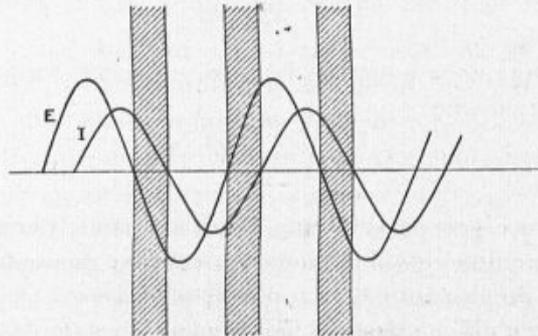
la nouvelle relation

$$\text{Force électromotrice} = \text{résistance} \times \text{intensité} + \Psi,$$

dans laquelle  $\Psi$  est une fonction du temps de la self-induction et de la capacité introduites dans le circuit (Chap. VII, p. 110).

Ajoutons enfin qu'il est possible de trouver numériquement la valeur de  $E_{\max}$ , pour la force électromotrice.

Fig. 14.

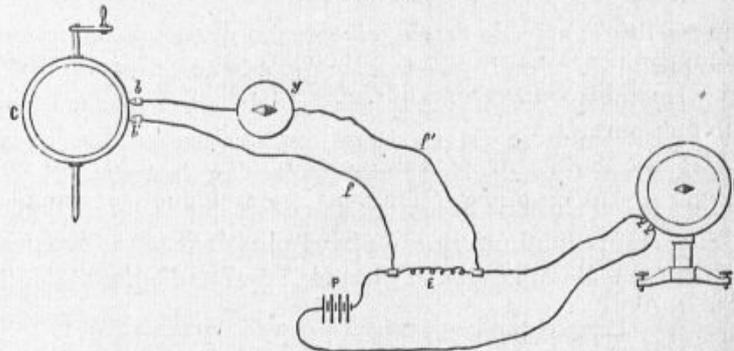


Courbes figuratives de la force électromotrice et de l'intensité dans un courant alternatif.

*Note :* Dans les intervalles ombrés la puissance est négative.

A cet effet, il suffit d'opposer cette force électromotrice à la différence de potentiel produite par un courant continu d'intensité connue aux bornes d'une résistance connue.

Fig. 15.



Détermination de la force électromotrice maximum d'un courant alternatif.

C'est ce qu'indique la figure 15, schéma des expériences de Carey-Foster et Maxwell pour la détermination de l'ohm.

En définitive, la force électromotrice et l'intensité d'un courant alternatif sont définies par la *fréquence* et par la *phase*.

Nous résumons ci-dessous les procédés pratiquement employés pour déterminer ces deux grandeurs.

*Méthode de M. Janet* <sup>(1)</sup>. — Cette méthode est très employée pour trouver la *fréquence* d'une tension alternative. Elle consiste à mettre l'une des bornes de cette tension en communication avec un style inscripteur en fer et l'autre avec le cylindre enregistreur correspondant.

Ce cylindre est recouvert d'une feuille de papier plongée au préalable dans une dissolution chimique susceptible de donner une trace colorée dès que la pointe de fer arrive au contact.

En conséquence, comme le mouvement du style dans un certain sens n'a lieu qu'une fois par période, il s'ensuivra que le nombre de périodes nous sera indiqué par celui des traces colorées.

On conçoit que cet ingénieux appareil nous permette la mesure des différences de phases pour deux ou plusieurs tensions alternatives : il suffira, en effet, de se servir de plusieurs styles pour un même cylindre.

*Méthode de M. Blondel* <sup>(2)</sup>. — Très ingénieusement trouvée, cette seconde méthode nous donne l'image photographique du courant alternatif.

Son appareil consiste en un galvanomètre appelé *oscillographe* et dont la sensibilité est assez grande pour suivre les variations de l'intensité du courant.

A l'aiguille mobile de ce galvanomètre se trouve fixé un miroir qui, réfléchissant un pinceau lumineux, vient donner sur une plaque photographique animée d'un mouvement uniforme la courbe exacte des oscillations du courant; cette courbe n'est pas rigoureusement une sinusoïde.

Terminons en signalant :

1° La méthode de M. Wienn <sup>(3)</sup>, dont l'appareil est connu sous le

<sup>(1)</sup> JANET, *Journal de Physique*, t. III, 1894.

<sup>(2)</sup> A. BLONDEL, *Oscillographes* (*Comptes rendus*, 1895); *Industrie électrique*, août 1899.

<sup>(3)</sup> WIENN, *Journal de Physique*, 3<sup>e</sup> série, t. I, p. 547.

nom de *téléphone optique* et qui consiste en somme en un téléphone dont la membrane mobile est reliée à un miroir mobile. On obtiendra, par ce moyen, lorsque la période du courant alternatif sera égale à celle de la vibration de la plaque, l'image optique de la vibration alternative.

2<sup>o</sup> Le galvanomètre à vibrations de Rubens <sup>(1)</sup> permettant de déceler des courants de 1 cent-millionième d'ampère.

*Force électromotrice et intensité efficaces.* — Ces deux nouvelles grandeurs s'emploient constamment dans l'application du courant alternatif et des courants polyphasés à l'industrie.

On les définit comme il suit :

*La force électromotrice efficace d'un électromoteur alternatif est une force électromotrice constante qui produirait pendant le même temps, à travers le même circuit, la même quantité de chaleur que la force électromotrice sinusoïdale de l'électromoteur considéré.*

Plus simplement, en ce qui concerne l'intensité, il est convenu de dire :

*Un courant alternatif a une intensité efficace égale à 1 ampère s'il produit dans un conducteur, pendant un certain temps, la même quantité de chaleur qu'un courant continu de 1 ampère pendant le même temps.*

Cette définition de l'intensité efficace nous en permet d'ailleurs immédiatement la mesure; il suffit de disposer d'un ampèremètre thermique étalonné au moyen de courants continus.

Plus simplement, on emploie l'électrodynamomètre de Siemens et Halwske, représenté par la figure 16. Cet appareil comprend une bobine fixe C et un anneau vertical mobile M.

La bobine fixe est à deux enroulements : l'un à gros fil aboutissant à la borne A, l'autre à fil fin à la borne A'; quant à la borne B elle est reliée métalliquement au godet de mercure *m'*, où plonge l'une des extrémités du cadre mobile, dont la deuxième extrémité

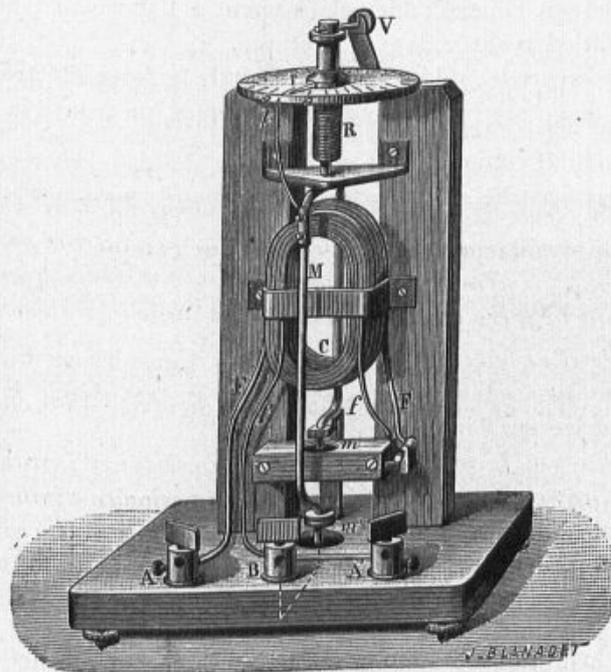
(1) RUBENS, *Journal de Physique*, 3<sup>e</sup> série, 1895, t. V, p. 31.

aboutit au gôdet *m* et, par suite, se trouve en communication avec les enroulements de la bobine fixe.

On conçoit donc qu'un même courant puisse partir de B, parcourir le cadre mobile, puis l'un ou l'autre des enroulements fixes et sortir soit par A, soit par A'.

Le couple électrodynamique sera donc proportionnel aux carrés

Fig. 16.



Électrodynamomètre Siemens.

de l'intensité; on annulera son action en ramenant le cadre à sa position primitive par la torsion du ressort R.

L'angle de torsion est déterminé par les index *l* et *i*, dont l'un est fixé au cadre et l'autre mobile devant un cadran divisé; sa valeur nous donnera celle de l'intensité efficace après graduation de l'appareil au moyen de courants continus.

Quant à la mesure de la force électromotrice efficace, elle s'effectue au moyen de l'électromètre à quadrants déjà mentionné (p. 16).

A cet effet, on commence par relier métalliquement l'aiguille

mobile à la première paire de quadrants et l'on établit ensuite la communication de chacune des paires de quadrants avec les bornes (bagues dans l'expérience du cadre tournant) de la force électromotrice sinusoïdale considérée.

Des considérations théoriques établissent que dans ces conditions la déviation fixe de l'aiguille est proportionnelle à la force électromotrice efficace cherchée pourvu toutefois que la période d'oscillation de l'aiguille soit considérable relativement à l'alternance de la période, condition réalisée dans la pratique.

Si l'on compare les valeurs numériques de la force électromotrice efficace et de la force électromotrice maximum, on trouve la relation simple

$$\text{Force électromotrice efficace} = \text{force électromotrice maximum} \times 0,707.$$

On aura pareillement dans un circuit quelconque

$$\text{Intensité efficace} = 0,707 \times \text{intensité maximum}.$$

*Énergie d'un courant monophasé.* — Considérons un alternateur monophasé en marche; soient à un instant donné  $E$  la force électromotrice et  $I$  l'intensité du courant.

Par définition, le produit  $EI$  s'appellera *puissance instantanée* de l'alternateur: c'est également une fonction périodique (voir *fig. 14*).

Cette puissance sera utilisée à produire deux sortes d'action; une partie sera emmagasinée dans la self-induction du circuit et la différence sera dépensée au même instant dans le circuit sous forme de chaleur.

C'est cette dernière énergie appelée quelquefois *énergie ohmique* que nous nous proposons de déterminer.

A un instant donné, elle est égale au produit de la résistance  $R$ , par le carré de l'intensité  $I$ , c'est-à-dire représentée par

$$RI^2,$$

mais le produit ainsi obtenu est variable avec le temps; pour en avoir la valeur moyenne pendant une période il faut en effectuer l'intégrale (Chap. VII, p. 117) et l'on trouve

$$\text{Puissance moy.} = \text{force électromotrice efficace} \times \text{Intensité efficace} \times \cos \varphi,$$

$\varphi$  étant le décalage entre la force électromotrice et l'intensité.

Par définition, le cosinus de l'angle de décalage ( $\cos\varphi$ ) s'appellera *facteur de puissance*, il prend, dans les diverses machines industrielles des valeurs comprises entre 0,3 et 0,99.

On peut le trouver directement au moyen d'instruments mesurant la différence de phase, mais pratiquement il est préférable de déterminer la puissance moyenne ou effective, c'est là le but des wattmètres et des compteurs d'énergie.

#### Wattmètres.

Ce sont des électro-dynamomètres légèrement modifiés.

La bobine fixe n'y possède en effet que quelques tours de gros fil; elle est parcourue par le courant principal et se comporte alors comme un *ampèremètre*.

La bobine mobile, constituée par du fil très fin, présentant conséquemment une grande résistance, fonctionne, au contraire, comme *voltmètre*, c'est-à-dire que le courant qui la parcourt est proportionnel à chaque instant à la force électromotrice dont nous cherchons la puissance.

Pour qu'il en soit ainsi, on mettra la bobine mobile en dérivation avec une résistance auxiliaire aux bornes de la tension alternative produisant le courant principal, en ayant bien soin de faire en sorte qu'il n'y ait aucune différence de phase entre ce courant principal et la tension, ce qui exige que la self-induction de la bobine mobile et de la résistance auxiliaire soit négligeable.

Nous donnons (*fig. 17*) le schéma d'un wattmètre; dans le système de connections qui y sont indiquées, la déviation de la bobine mobile est produite par l'action électrodynamique de deux courants  $I + i$  et  $i$ , c'est-à-dire est sensiblement proportionnelle au produit  $Ii$ , et, comme  $i$  est lui-même proportionnel à la force électromotrice, il s'ensuit que le couple électrodynamique sera proportionnel à chaque instant à la puissance cherchée.

Sous l'action de ce couple la bobine produit la rotation du ressort vertical à l'extrémité duquel elle est fixée jusqu'à ce que le moment de torsion du ressort soit égal au moment du couple électrodynamique; à ce moment, on peut dire que l'angle de rotation mesure la puissance cherchée.

Il suffira donc d'étalonner cet appareil au moyen d'un courant continu pour avoir, par une seule lecture, la puissance effective d'un courant alternatif.

Ajoutons que, au lieu de mesurer l'angle de rotation de la bobine,

Fig. 17.

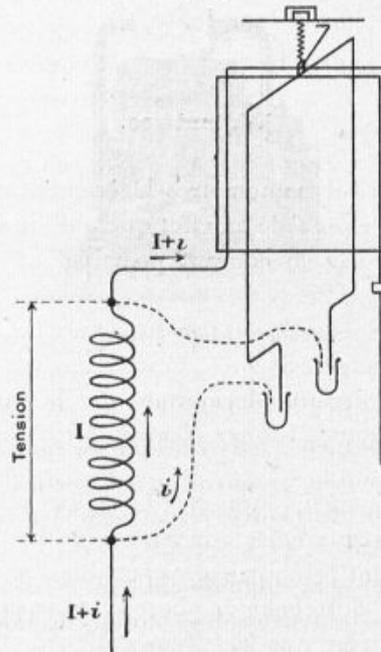


Schéma d'un wattmètre.

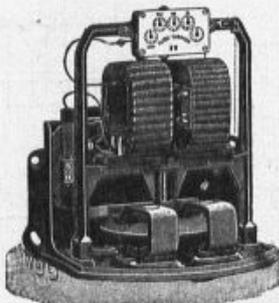
il est préférable de la ramener à sa position initiale par la torsion du ressort et de mesurer la puissance par la grandeur de cet angle de torsion.

C'est sur ces données générales que l'on a construit des wattmètres et des compteurs industriels d'énergie, dont les plus employés sont le wattmètre Gauz et le compteur Elihu-Thomson que nous décrivons rapidement.

*Compteur d'énergie Elihu-Thomson.* — Cet appareil est actuellement très employé et peut servir à déterminer l'énergie pendant un temps donné soit d'un courant continu, soit d'un courant alternatif.

Le courant alternatif y parcourt deux bobines de gros fil B et C en regard l'une de l'autre, ce qui produit un champ magnétique intense; dans ce champ se trouve un cadre mobile appelé *induit Siemens*, que l'on a placé en dérivation sur la tension considérée.

Fig. 18.



Compteur Elihu-Thomson.

De cette façon cet induit est parcouru par le courant  $i = \frac{E}{R}$  et se trouve soumis à l'action électrodynamique du courant principal I des bobines. A l'induit mobile autour d'un axe vertical se trouve fixé un disque de cuivre qui se trouve placé entre les branches de deux aimants en fer à cheval.

Le couple résistant sera donc fourni par ces deux aimants; il sera donc proportionnel à l'intensité des courants de Foucault développés dans le disque, c'est-à-dire proportionnel à la vitesse de rotation du disque.

On fera en sorte que le mouvement du disque devienne uniforme et, le couple moteur étant alors égal au couple résistant, l'énergie, pour un temps donné, sera proportionnelle au nombre de tours dont le plateau aura tourné pendant ce temps.

Ce nombre de tours nous sera indiqué par un compteur approprié.

*Énergie des courants polyphasés.* — Le calcul théorique de cette énergie sera indiqué (Chap. VII, p. 118).

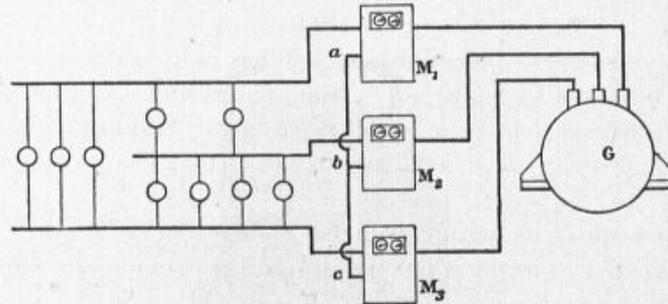
Nous donnerons ici sommairement les appareils de mesure le plus généralement employés.

Tout d'abord le procédé le plus simple consiste à employer deux ou trois wattmètres suivant qu'il s'agit de courants bi- ou triphasés.

La figure 19 donne ce schéma de l'installation de ces wattmètres pour courants triphasés.

Dans ce système, les trois bobines à gros fil sont serrées aux fils de

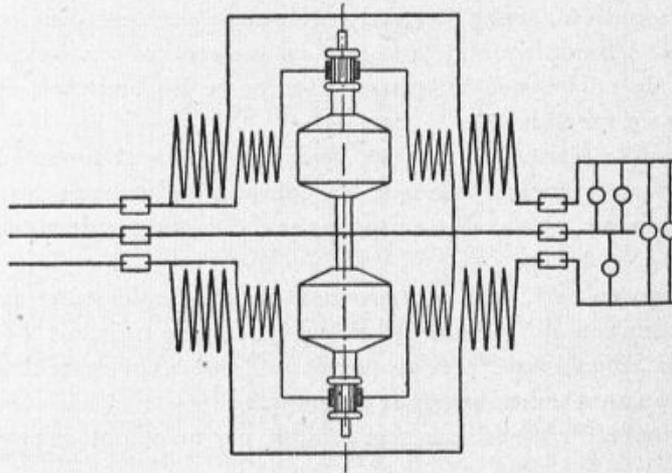
Fig. 19.



Mesure de l'énergie d'un système triphasé au moyen de 3 wattmètres.

ligne, tandis que les trois bobines en fil fin montées en étoile à l'une

Fig. 20.



Modification du compteur Elihu-Thomson pour courants triphasés.

de leurs extrémités sont reliées à l'autre extrémité, chacune avec leur conducteur respectif.

La somme des lectures de chaque wattmètre nous donnera la puissance du système triphasé.

On comprendra de même que par modification du compteur Elihu-Thomson on puisse arriver au même résultat.

Notamment, en donnant à ce compteur deux paires de bobines d'inducteur et deux armatures Siemens fixées sur l'arbre rotatif du disque de cuivre, on obtiendra, par la lecture du nombre de tours de ce disque, l'énergie d'un système diphasé.

En modifiant les connections des bobines inductrices et de l'induit comme l'indique la figure 20, le compteur Elihu-Thomson à deux induits calés sur l'arbre et à deux paires de bobines inductrices, pourra également servir à la mesure de l'énergie en courants triphasés (1).

D'autres appareils, parmi lesquels l'ondographe de M. Hospitalier, basés sur des considérations théoriques peuvent également nous donner la même mesure.

---

(1) La théorie complète de cette modification se trouve Chap. VII, p. 131.

---

### CHAPITRE III.

#### GÉNÉRATEURS POLYPHASÉS.

---

Toute machine génératrice de courants polyphasés se compose de deux parties; l'une créant le champ magnétique et appelée *inducteur*; l'autre recevant les courants d'induction constituant l'*induit*.

Deux cas peuvent se présenter suivant que l'induit est mobile ou fixe; d'où les deux groupes d'alternateurs :

- 1° Alternateurs à induit mobile;
- 2° Alternateurs à induit ou bobinage fixe.

Le deuxième groupe pourra lui-même se subdiviser suivant que l'inducteur sera mobile ou fixe; dans ce dernier cas, une pièce de fer appelée *fer tournant*, influencée par l'inducteur fixe, le remplacera dans son action inductive sur le bobinage fixe.

Avant de commencer l'étude de ces appareils il nous a paru indispensable de rappeler la constitution et le fonctionnement des machines à courant continu, dites *dynamo*, pour des raisons multiples dont les principales sont les suivantes :

- 1° La dynamo légèrement modifiée peut donner naissance aux courants polyphasés;
- 2° La dynamo peut servir de transformateur des courants polyphasés en courant continu;
- 3° La dynamo ne diffère d'un alternateur que par la suppression de son collecteur. Toutefois, comme nous n'avons pas à traiter de l'étude des dynamos, nous nous contenterons d'étudier dans l'une d'elles, prise pour type, tout ce qui pourra se rapporter à l'étude des courants polyphasés.

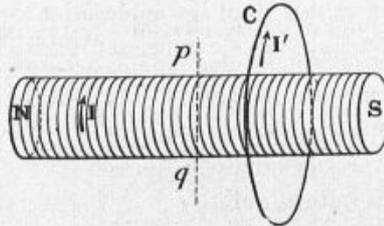
Enfin, nous choisissons la dynamo Gramme non seulement parce qu'elle est la première industriellement employée, mais surtout parce que, le premier, Gramme obtint en 1877, pour l'éclairage des bougies Jablochkoff au moyen de sa machine, un système de courants réellement polyphasés.

## ÉTUDE DE LA DYNAMO GRAMME.

On peut en expliquer le mécanisme à l'aide des considérations très élémentaires suivantes :

Considérons un solénoïde et un circuit circulaire C (*fig. 21*) con-

Fig. 21.



centrique, parcouru par un courant  $I'$  de même sens que le courant  $I$  du solénoïde; donnons au circuit C plusieurs positions entre les pôles N et S du solénoïde.

Supposons-le d'abord placé entre la ligne neutre  $pq$  et le pôle S; on voit immédiatement qu'il se rapprochera de la ligne neutre, car, d'après les lois de l'électrodynamique, l'attraction des courants parallèles est plus forte du côté du pôle N que du côté du pôle S.

Dans une deuxième expérience, plaçons le circuit C entre la ligne neutre et le pôle N; nous constaterons qu'il s'éloignera de N pour arriver à la ligne neutre.

Supprimons maintenant le courant dans le circuit C et forçons-le à se déplacer; il s'y produira des courants d'induction dont le sens est tel, d'après la loi de Lenz, qu'ils s'opposent au mouvement; partons de la ligne neutre et déplaçons le circuit vers S, le courant induit devant s'opposer au mouvement aura donc la même direction que le courant  $I$  du solénoïde.

Arrivé en S, si l'on ramène le circuit vers la ligne neutre, le courant qui le parcourra aura une direction contraire à celle du courant  $I$ .

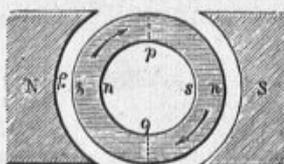
Ainsi donc, quand le circuit mobile s'éloigne de la ligne neutre, il s'y développe un courant d'induction de même que celui du solénoïde; quand il s'en rapproche le courant induit est de sens contraire à celui du solénoïde.

Les mêmes conclusions ont lieu si, au lieu d'une seule spiré circulaire, nous avons une petite bobine plate se déplaçant comme la spiré unique. Il en sera encore de même si nous substituons un aimant réel au solénoïde fictif, puisqu'il y a équivalence électrodynamique entre un aimant et un solénoïde.

Considérons donc un anneau circulaire de fer doux placé entre les pôles N et S d'un puissant aimant NS.

Cet anneau s'aimante par influence et se divise en deux aimants demi-circulaires  $spn$  et  $nqs$  dont les solénoïdes équivalents peuvent être considérés comme animés de courants de direction contraire.

Fig. 22.



En conséquence et d'après ce qui précède, si la bobine plate se déplace de  $p$  vers  $n$ , il s'y développera un courant induit de même sens que les courants particuliers du solénoïde équivalent au demi-aimant supérieur; son mouvement continuant et la bobine se rapprochant de la ligne neutre  $q$ , elle se trouve parcourue par un courant de sens contraire à celui du solénoïde inférieur et, par suite, de même sens que le courant du solénoïde fictif supérieur.

Ceci revient à dire que pendant tout le trajet  $pnq$  la bobine plate est parcourue par un courant induit de sens invariable.

Un raisonnement identique nous montrerait que le courant qui y circule a encore une direction constante pendant la deuxième demi-rotation  $qsp$ , mais que cette direction est de sens contraire à la première.

Il suffirait d'ailleurs de relier les extrémités de la bobine à un galvanomètre pour démontrer expérimentalement le changement de sens du courant au passage de la ligne neutre.

Supposons maintenant un certain nombre de bobines réunies bout à bout et tournant d'un même mouvement, nous pourrions dire que toutes les bobines à gauche de la ligne neutre  $pq$  seront parcourues par un courant de même sens mais de sens contraire à celui qui con-

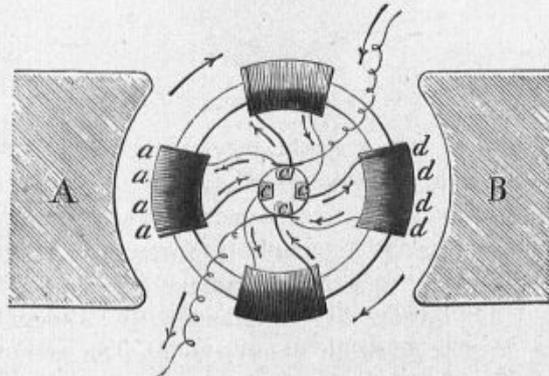
cernera les bobines placées à la droite de cette ligne neutre, le changement de sens ayant précisément lieu en cet endroit.

Rien ne sera changé si, au lieu de faire tourner les bobines, on fait tourner l'anneau, puisque les pôles des aimants semi-circulaires restent fixes.

Si donc on place deux bornes métalliques *cc* en face des lignes neutres *p* et *q* et qu'on relie entre elles ces bornes par un conducteur, on voit que dans ce conducteur le courant *y* possédera une direction constante.

Nous donnons ci-contre (*fig. 23*) la marche des courants induits

Fig. 23.



dans un système de quatre bobines séries, l'anneau mobile se mouvant de gauche à droite.

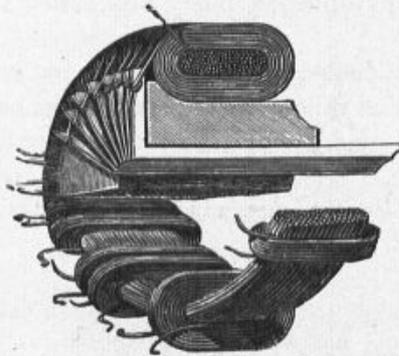
Ayant ainsi expliqué le jeu de la machine, décrivons-en les diverses parties.

*Induit et collecteur.* — L'induit, improprement appelé *induit à anneau*, affecte la forme d'un cylindre creux; pratiquement, il est formé de fils de fer doux constituant un ensemble sensiblement cylindrique. Autour du tube ainsi formé on a enroulé dans le même sens un fil conducteur isolé, entièrement fermé sur lui-même. Cet enroulement se fait en divisant le fil en sections ou bobines plates réunies en série. Nous donnons figure 24 un schéma de cet enroulement.

Le collecteur est formé d'un certain nombre de tiges de cuivre isolées; à chaque tige aboutissent les extrémités de deux bobines consécutives, ce qui exige que tout d'abord cette tige soit dirigée

suivant le rayon de l'anneau, se recourbe à angle droit pour devenir parallèle à l'axe de rotation. On voit sur la figure 24 en RR l'une de

Fig. 24.



Induit Gramme.

ces tiges ; le cylindre formé par leur ensemble est soigneusement isolé de l'axe de rotation par une bague de bois.

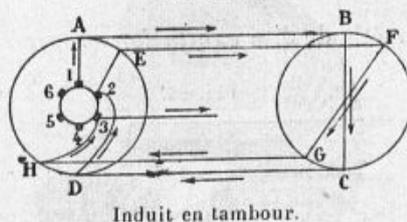
Sur le cylindre ainsi constitué, par ces tiges conductrices et qui s'avance hors des électro-aimants produisant le champ, viennent frotter deux balais composés d'un grand nombre de fils métalliques communiquant aux bornes du circuit extérieur. Chaque balai doit être constitué de telle sorte qu'il puisse frotter en même temps sur deux lames voisines afin d'éviter l'interruption du courant. Théoriquement ces balais doivent être placés sur un même diamètre, coïncidant avec la ligne neutre. Or, la position de cette ligne est variable par suite de la self-induction développée dans les spires et surtout par suite de la formation de pôles secondaires dans l'anneau ; on convient de désigner sous le nom d'*angle de calage* l'angle que forme la ligne neutre réelle avec sa position théorique. Il faudra monter les balais sur une pièce mobile autour de l'axe de manière à pouvoir modifier cet angle ; il suffit pratiquement de faire en sorte que les étincelles jaillissant entre les balais et le collecteur soient réduites au minimum <sup>(1)</sup>.

A côté de cette disposition vient se placer celle connue sous le nom d'*induit en tambour* ou induit Siemens figuré par le schéma (*fig. 24 bis*). Le cylindre supportant l'enroulement est formé par un assemblage de feuilles de tôles circulaires normales à l'axe commun.

(<sup>1</sup>) Chap. VII, p. 135.

Les fils induits placés parallèlement à cet axe aboutissent, comme dans l'induit en anneau, aux bornes isolées d'un collecteur extérieur; la seule différence effective entre les deux sortes d'induits consistera

Fig. 24 bis.



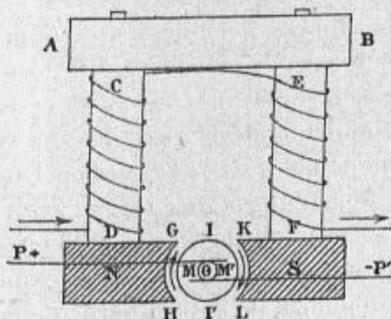
Induit en tambour.

donc dans la suppression des parties des spires intérieures au cylindre. Nous n'examinerons pas les autres dispositions possibles (enroulement ondulé, enroulement imbriqué) en renvoyant le lecteur aux traités spéciaux.

*Inducteurs.* — On pourrait employer un aimant permanent; mais pour de multiples raisons, dont la principale est la raison économique, on n'utilise plus dans l'industrie que des électro-aimants.

Dans une machine, cet électro-aimant indiqué par la figure 25

Fig. 25.



comprend trois parties : 1° la culasse AB; 2° les noyaux CD, EF; 3° les pièces polaires NS.

On en obtient l'excitation par un courant auxiliaire circulant dans ces bobines qui entourent les noyaux.

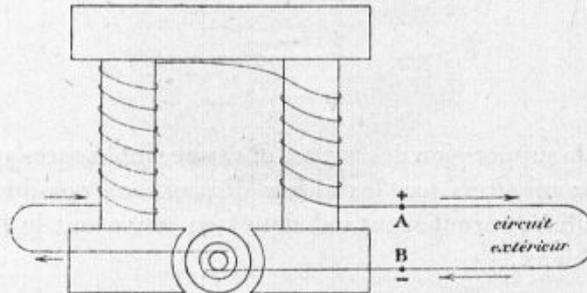
Pour obtenir ce courant auxiliaire on peut employer divers procédés.

Ou bien on l'empruntera à une source absolument indépendante de la machine; ou bien, au contraire, il nous sera fourni par la machine même.

Dans ce dernier cas, seul utilisé dans la pratique, il y a trois manières d'opérer.

Une première méthode dite *excitation en série* consiste à inter-

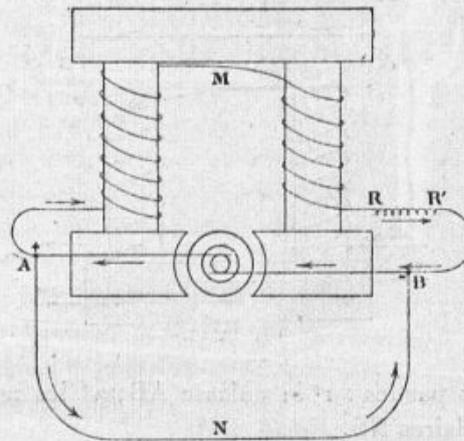
Fig. 26.



Excitation en série.

caler dans le circuit extérieur la résistance des bobines excitatrices,

Fig. 27.

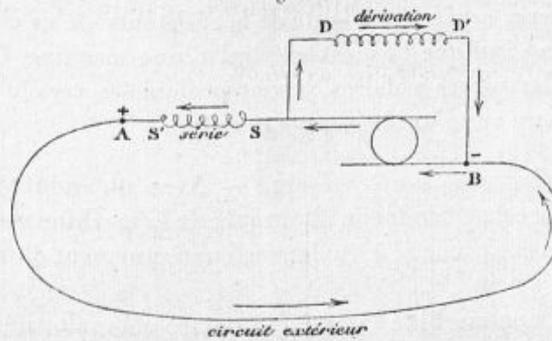


Excitation en dérivation.

de manière à n'avoir, somme toute, qu'un seul circuit. C'est ce qu'indique la figure 26.

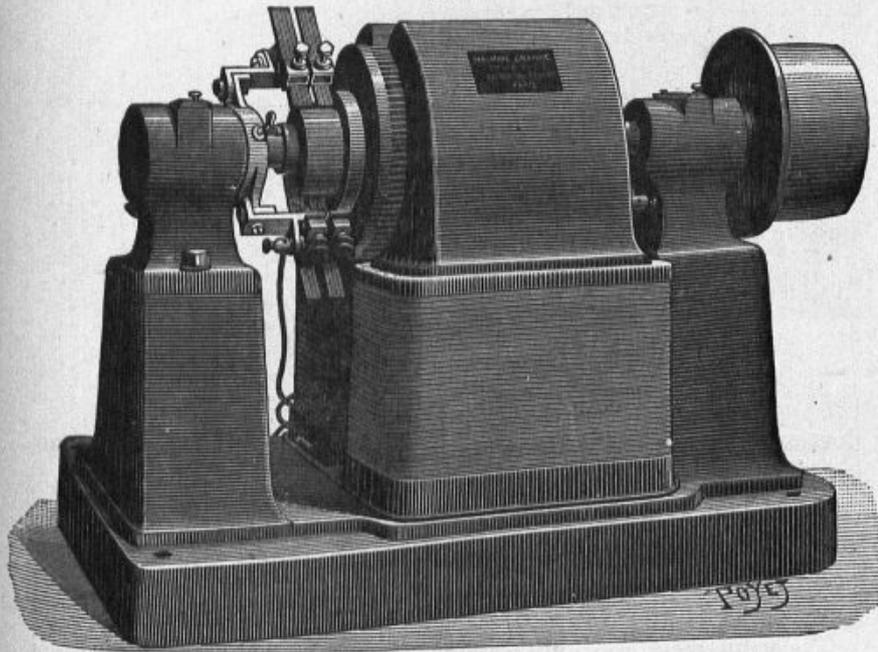
On modifie facilement ce procédé en établissant le circuit des bobines en dérivation sur le circuit principal (*fig. 27*).

Fig. 28.



Enfin, les bobines des électro-aimants peuvent être constituées par

Fig. 29.



Machine Gramme.

un double enroulement réalisant, l'un l'excitation en série, l'autre l'excitation en dérivation (*fig. 28*).

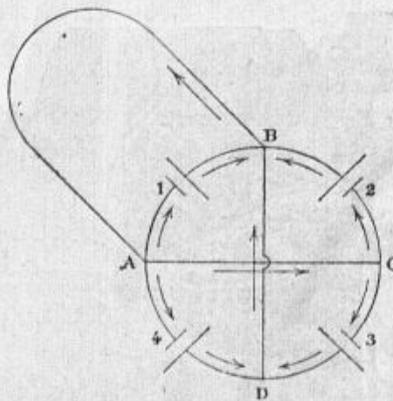
On obtient alors l'excitation *compound*, et une théorie complète nous montrerait que, dans ce cas, la différence de potentiel aux balais, c'est-à-dire la force électromotrice du courant parcourant le circuit extérieur, est indépendante de la résistance de ce circuit.

La figure 29 indique l'aspect général d'une machine Gramme à deux pôles; les pièces polaires y sont prolongées vers le haut pour rendre le champ aussi uniforme que possible.

*Machine Gramme multipolaire.* — Avec un inducteur à deux pôles le nombre de périodes ou alternance de la machine est restreint. Nous sommes donc amené à étudier le fonctionnement d'une dynamo multipolaire.

Imaginons une machine Gramme à quatre pôles alternés; il y aura évidemment deux lignes neutres et les forces électromotrices d'in-

Fig. 30.



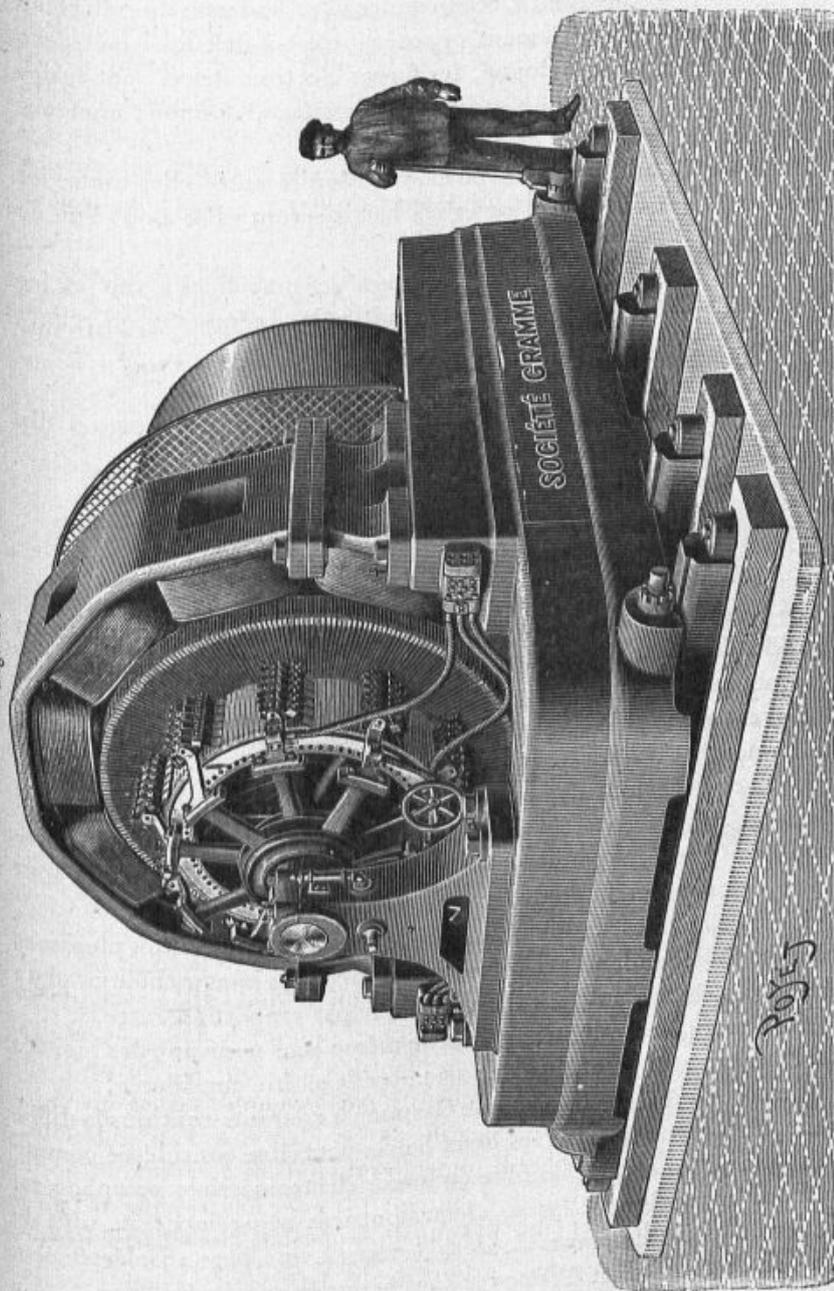
duction seront réparties de la même manière que si l'on imagine un système de quatre piles montées comme l'indique la figure 30.

Or, si l'on monte ces piles en quantité en réunissant en un point commun A tous leurs pôles positifs par exemple, et, en un autre point B, tous leurs pôles négatifs, il est clair que l'on obtiendra, entre ces deux points A et B, un courant continu.

Théoriquement, puisqu'il y a autant de lignes neutres que de paires de pôles, il faudrait autant de balais que de pôles, ces balais ne formant évidemment que deux groupes.

Mais il est possible de n'avoir que deux balais grâce à un dispositif

Fig. 31.



Machine Gramme à 10 pôles et à 10 balais séries en deux groupes.

dû à M. Mordey consistant à réunir entre elles les lames du collecteur physiquement diamétralement opposées; c'est-à-dire les lames dans lesquelles, à un instant donné, les forces électromotrices sont égales et de sens contraire. Pour expliciter davantage, donnons quelques exemples.

Dans un induit à quatre pôles, on réunira entre elles toutes les lames opposées du collecteur et les balais seront calés à  $90^\circ$  l'un de l'autre.

Pour un induit à six pôles les lames seront reliées à  $120^\circ$  et les balais calés à  $60^\circ$ ; de même, avec huit pôles inducteurs on reliera les lames à  $90^\circ$  et les balais calés à  $45^\circ$ .

La généralisation est évidente.

Nous donnons, figure 31, l'aspect général d'une dynamo à dix pôles et à dix balais séries en deux groupes.

#### Alternateurs polyphasés à induit mobile.

Ce premier groupe d'alternateurs comprend tout d'abord toutes les modifications que l'on peut faire subir à la machine Gramme à l'effet d'en obtenir des courantsphasés.

Il n'est pas inutile de rappeler que ces modifications s'appliqueront intégralement d'ailleurs à toute autre dynamo.

Remarquons tout d'abord que deux torons *a* et *b* de l'anneau Gramme constituent deux cadres tournants dans un champ sensiblement constant en grandeur et en direction et dont les plans font entre eux un certain angle.

L'expérience est la même que celle du cadre tournant à plusieurs circuits indépendants; il se produit donc dans chaque bobine plate des forces électromotrices décalées l'une par rapport à l'autre.

Ces forces électromotrices sont de même sens pour une des moitiés de l'anneau mobile et ce sens varie avec la moitié considérée.

En sorte que dans la machine Gramme à courants continus la différence de potentiel entre les deux balais peut être considérée comme la somme d'un certain nombre de forces électromotrices polyphasées.

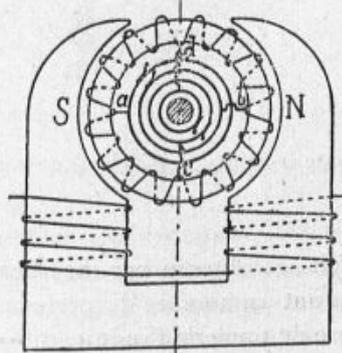
Pour recueillir ces forces électromotrices séparément, il suffit de relier le point commun de deux torons à une bague isolée fixée à l'arbre de rotation et d'appuyer sur chaque bague un frotteur.

On recueillera, entre chaque paire de frotteurs, des forces électromotrices sinusoïdales décalées entre elles d'une quantité constante.

*Cas des courants biphasés.* — Pratiquement, en ce qui concerne les courants biphasés, nous pouvons, entre autres dispositifs, adopter le suivant : nous relierons à deux paires de bagues isolées quatre points de l'induit, situés deux à deux aux extrémités de deux diamètres rectangulaires.

Sur chaque bague frottera un balai ; nous relierons entre eux par un circuit extérieur les balais correspondants aux points diamétra-

Fig. 32.



Machine Gramme biphasée à deux pôles.

ment opposés et nous obtiendrons dans ces circuits un système de courants décalés de  $\frac{\pi}{2}$  (fig. 32).

Il était possible de prévoir ce résultat de l'expérience dite *des spires mobiles* (p. 5), dans laquelle nous avons vu deux spires distantes angulairement de  $90^\circ$  produire des forces électromotrices diphasées.

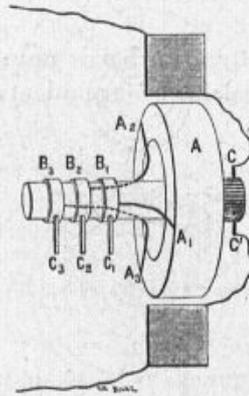
*Cas des courants triphasés.* — Divisons l'anneau Gramme en trois parties égales et aux points de division soudons des fils que nous ferons aboutir à trois bagues isolées  $B_1, B_2, B_3$  sur lesquelles appuient des balais  $C_1, C_2, C_3$ .

On sait qu'entre deux quelconques de ces balais, il existe une force électromotrice dont la phase varie alternativement de  $\frac{2\pi}{3}$ , de

telle sorte qu'en les groupant deux à deux on obtiendra trois forces électromotrices triphasées pouvant produire dans des circuits extérieurs des courants correspondants.

Nous représentons ci-contre en perspective (*fig. 33*) et en projection (*fig. 34*) une machine Gramme à courants triphasés.

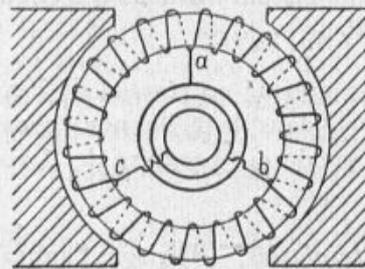
Fig. 33.



Les courants polyphasés obtenus par modification de la machine Gramme à deux pôles ont un nombre de périodes par seconde exactement égal au nombre de tours de l'induit.

Or, dans l'utilisation des courants polyphasés pour le transport de

Fig. 34.



Machine Gramme triphasée bipolaire  
à trois bagues isolées.

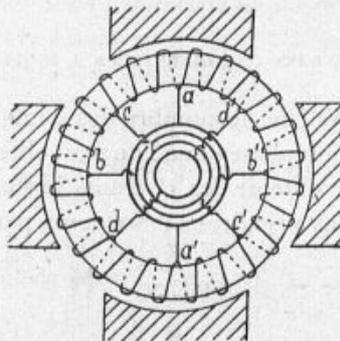
l'énergie il est utile d'opérer avec des courants de grande fréquence.

Aussi a-t-on appliqué aux machines multipolaires les mêmes modifications que pour la machine bipolaire.

Considérons, par exemple, une machine Gramme à quatre pôles alternés (*fig. 35*).

Relions les points  $aa'$ ,  $bb'$  de l'induit, deux à deux diamétralement

Fig. 35.



Dynamo Gramme tétrapolaire biphasee.

opposés à deux bagues isolées; nous aurons, entre ces deux bagues, une force électromotrice qui, dans le cas de la figure, est nulle.

Opérons de même pour quatre autres points  $ee'$ ,  $dd'$  situés aux extrémités de deux diamètres rectangulaires faisant, avec les diamètres correspondants du premier groupe, des angles de  $45^\circ$ , nous obtiendrons alors entre les nouvelles bagues une force électromotrice différente et qui, pour le schéma considéré, sera maximum.

L'anneau tournant, il arrivera qu'après une rotation de  $45^\circ$  les points  $aa'$ ,  $bb'$  auront pris la place des points  $cc'$ ,  $dd'$ , ce qui revient à dire qu'entre une valeur nulle de la première force électromotrice et le maximum de l'autre, il y a une rotation de  $45^\circ$ .

On peut encore dire que le quart de la période commune aux courants alternatifs produits correspond à une distance angulaire de  $45^\circ$ , c'est-à-dire que pour un tour complet de l'anneau nous aurons deux périodes.

Indépendamment des modifications précédentes, toute machine génératrice polyphasée comprend un inducteur fixe constitué par un certain nombre d'électro-aimants ou pôles dont les bobines excitatrices produisent, autour de la partie mobile, une couronne de pôles alternés et équidistants; il en résulte dans l'intérieur de cette couronne un champ magnétique dans lequel tournera la partie mobile ou induit que nous allons sommairement décrire.

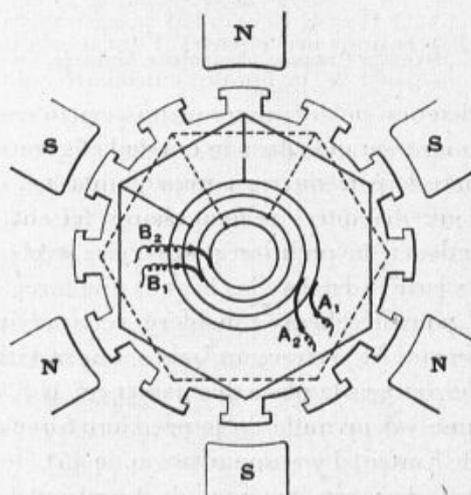
C'est un noyau cylindrique en tôle, feuilleté normalement à l'axe et présentant à sa périphérie, soit de larges dents, soit des rainures, d'où les dénominations d'*induit à dents* ou *massé* et d'*induit à rainures* ou *induit réparti*.

#### INDUIT A DENTS DANS UN ALTERNATEUR A INDUCTEURS FIXES.

Dans ce premier système le nombre des dents est variable avec la nature des courants polyphasés que l'on veut obtenir.

Par exemple, pour obtenir des courants biphasés avec un inducteur à six pôles, nous prendrons deux dents par pôle, puisque nous

Fig. 36.



Coupe figurative d'un alternateur diphasé à induit mobile.

*Note :* Sur l'induit à douze dents on a placé deux séries de bobines comme l'indiquent les tracés hexagonaux en traits pleins ou pointillés; les extrémités de chaque série aboutissent à des bagues isolées permettant de recueillir aux balais  $A_1, A_2$  et  $B_1, B_2$  les courants diphasés.

devons avoir deux circuits distincts, ce qui constituera un induit à douze dents.

Comment allons-nous placer sur ces dents les bobines dans lesquelles doivent se produire les courants induits ?

Un premier dispositif consiste à ne mettre qu'une bobine par dent de telle sorte que toute bobine de l'un des circuits sera comprise entre deux bobines de l'autre circuit.

Dans une autre disposition toute bobine induite reposera sur deux dents, on obtiendra encore deux circuits distincts mais les bobines de ces deux circuits chevaucheront l'une sur l'autre.

La figure 36 indique un tel bobinage.

On voit facilement que les circuits ainsi constitués sont parcourus par des courants biphasés.

En effet, entre deux pôles alternés N et S se produit un champ magnétique et, par suite de la disposition de ces pôles, la force électromotrice induite dans une bobine sera maximum quand elle sera équidistante de chacun d'eux et nulle quand elle sera parallèle à l'un quelconque.

Or, dans les dispositions précédentes, l'une des bobines du premier circuit prendra la place de la bobine consécutive du deuxième circuit après une rotation de  $30^\circ$ , et comme la période correspond à une rotation de  $120^\circ$  les courants qui parcourront ces deux bobines seront décalés d'un quart de période, c'est-à-dire biphasés.

Il est clair d'ailleurs que l'on peut remplacer chaque grosse dent par plusieurs petites à la condition d'opérer la même réduction pour chaque grosse bobine induite.

D'une façon générale, on peut donc se servir d'un nombre quelconque de dents munies de bobines induites dont l'enroulement doit être tel qu'il y ait deux circuits nettement distincts placés sur l'induit de telle façon que l'un prenne la place de l'autre dans l'espace, après une rotation de l'induit correspondant au quart de la période, la période étant le temps que met l'induit à tourner d'un angle égal à celui qui sépare deux pôles de même espèce, ainsi que nous l'avons vu page 5, Chap. I.

Les mêmes considérations se répètent pour le cas des courants triphasés; on pourra se servir d'un induit à 18 dents et de 6 bobines par circuit, mais ce nombre est variable et n'est assujéti qu'à être un multiple de 3.

Nous n'en examinerons pas toutes les combinaisons; il suffit de faire en sorte que les trois circuits dans lesquels se produisent les courants triphasés soient placés sur l'induit à des distances angulaires l'une de l'autre égales au tiers de la période.

### Induit à rainures dans un alternateur à inducteurs fixes.

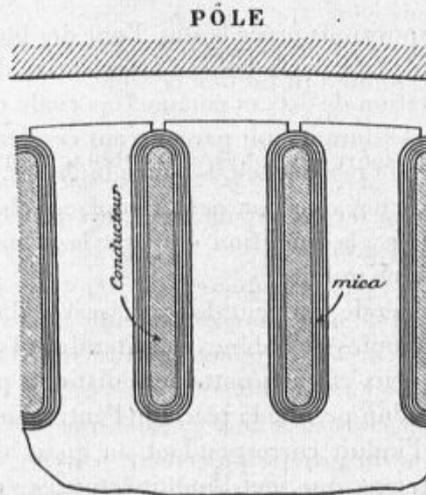
On doit ce nouveau procédé, pour le bobinage de l'induit, à l'ingénieur Brown.

Il consiste à remplacer les larges rainures existant entre les dents de l'aiguille précédente par un grand nombre de trous pratiqués à la périphérie de l'induit et parallèlement à son axe; ces trous affectent la forme circulaire ou oblongue.

Chacun d'eux reçoit une barre métallique, de cuivre en général, et soigneusement isolée.

Ces barres sont connectées de telle sorte que leur ensemble forme

Fig. 37.



Coupe de l'induit dans un alternateur du Niagara.

deux ou trois circuits distincts suivant la nature des courants polyphasés que l'on veut obtenir et nous rappelons qu'il est possible de faire ce bobinage d'un grand nombre de manières.

Nous donnons (*fig. 37*) l'aspect des rainures dans l'alternateur du Niagara; les dimensions en sont :

Profondeur.....	58 <sup>mm</sup>
Largeur.....	11
Longueur.....	50

Chacune d'elles en partie ouverte à la périphérie reçoit une barre de cuivre appropriée et isolée au mica.

Cette disposition, ainsi que le nombre de barres métalliques par phase et par pôle, varie d'ailleurs d'un constructeur à l'autre; enfin il est évident que les barres peuvent être remplacées par des bobines.

Il résulte donc que l'enroulement de l'induit peut se faire d'un grand nombre de façons; on peut donc se demander quelle est la meilleure de toutes les dispositions que l'on peut adopter. La réponse à cette question dépend du voltage que la machine doit fournir.

Pour les voltages très élevés, 1500 volts par exemple, il faut à l'induit une résistance très grande, un grand nombre de conducteurs, ce qui fait que dans ce cas on emploiera un grand nombre de bobines en fil fin construites à part sur un gabarit et que l'on disposera ensuite dans des encoches appropriées.

Si le voltage s'abaisse à quelques centaines de volts, les barres de cuivre suffiront et donneront un bon résultat.

#### Générateurs polyphasés à bobinages fixes.

On peut également les diviser en deux groupes suivant la constitution de l'inducteur mobile.

Dans un premier cas, cet inducteur se compose d'électro-aimants placés à la périphérie d'une roue concentrique à la couronne supportant le bobinage fixe; on convient de dire que l'alternateur est à induit fixe et à inducteur mobile.

Un autre procédé consiste à faire en sorte que le courant, exciteur des électro-aimants du groupe précédent, traverse une ou plusieurs bobines fixes produisant dans une pièce de fer mobile des polarités dont la réaction sur l'induit *fixe* mobile engendrera les courants polyphasés; par convention, nous dirons qu'un tel alternateur est caractérisé par un induit fixe, un inducteur fixe et qu'il possède un fer tournant.

*En réalité le fer tournant est le véritable inducteur et il nous paraît inutile de sérier les alternateurs polyphasés en trois groupes.*

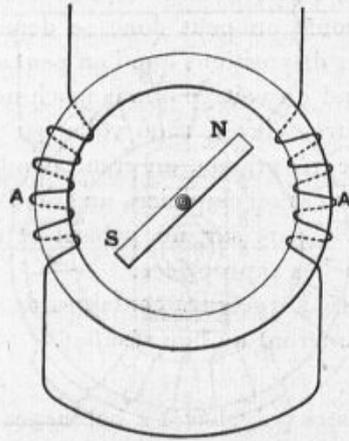
Ceci posé, donnons tout d'abord le principe de ces machines en commençant par le générateur monophasé.

A cet effet, imaginons (*fig. 38*) un aimant NS que l'on fera tourner

autour d'un axe projeté en  $O$ , centre d'un anneau en forme de tore sur lequel on a enroulé deux bobines  $A$  et  $A'$  symétriques; nous produirons ainsi dans ces bobines un courant alternatif.

Sur le même anneau, disposons une deuxième paire de bobines

Fig. 38.



Générateur monophasé à induit fixe.

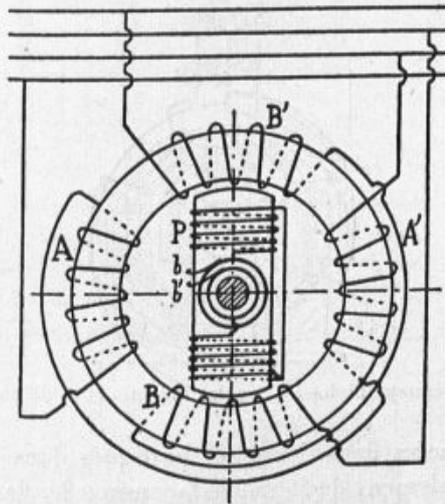
à  $90^\circ$  des premières; il est facile de prévoir que le courant alternatif qui parcourra ces nouvelles bobines sera décalé d'un quart de période par rapport au premier.

En effet, lorsque la force électromotrice est maximum dans  $AA'$ , elle est nulle dans  $BB'$ : le contraire a lieu après une rotation de  $90^\circ$  de l'inducteur mobile. Le décalage est donc de  $\frac{\pi}{2}$ . La généralisation est évidente et, si sur un même anneau nous disposons  $p$  groupes de deux bobines équidistantes, nous obtiendrons aux extrémités de chaque groupe des courants décalés de  $\frac{2\pi}{2p}$ . Il est d'ailleurs évident que l'on peut remplacer l'aimant permanent par un électro-aimant aux extrémités duquel on donnera une polarité constante par un courant auxiliaire aboutissant à deux bagues isolées.

Si l'on actionne rotativement cet électro-aimant, il remplacera entièrement l'aimant permanent précédent et les bobines groupées en deux séries seront parcourues par des courants biphasés. C'est le cas du générateur Tesla dont le schéma est représenté (*fig. 39*).

Mais, industriellement, il y a avantage à remplacer l'électro-aimant à deux pôles N et S par un électro-aimant à  $2p$  pôles alternativement N et S; il faut dans ce cas augmenter le nombre de bobines utilisées

Fig. 39.



Générateur biphasé Tesla.

*Note :* Le mouvement de rotation de l'électro-aimant, actionné par un courant continu arrivant aux bagues  $b$  et  $b'$ , engendre dans les bobines  $AA'$ ,  $BB'$  et, par suite, dans les fils de ligne  $y$  aboutissant des courants biphasés.

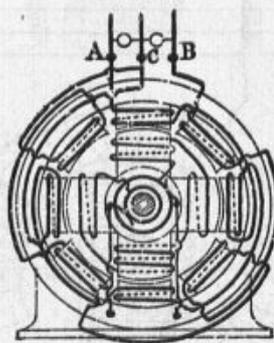
pour chaque phase et dans le cas d'un électro-aimant à quatre pôles il nous faudra pour l'obtention des biphasés 8 bobines, soit 4 bobines par phase. Un pareil générateur est représenté par la figure 40.

Dans les machines modernes, l'inducteur à 4 pôles est peu employé; on lui substitue l'inducteur à 8 pôles, et même à 72 pôles inducteurs (machine A. E. G. C., 1900). D'une façon générale, soit  $n$  le nombre des pôles inducteurs mobiles; au bout d'une rotation de  $\frac{2\pi}{n}$  l'inducteur occupe, par rapport aux bobines induites, des positions successives identiques; deux bobines induites du même groupe seront donc séparées angulairement de  $\frac{2\pi}{n}$ . Si donc on veut construire une machine triphasée à  $n$  pôles, il faudra placer dans cet angle deux autres bobines appartenant à des groupes différents, en sorte que

tout reviendra à disposer sur la couronne fixe des bobines séries en trois groupes et distantes angulairement de  $\frac{2\pi}{3n}$ .

Pratiquement, ces bobines induites sont remplacées par des barres

Fig. 40.



Générateur biphasé à 4 pôles inducteurs et fil unique.

métalliques, placées dans des trous pratiqués dans la couronne fixe et groupées également de la même façon que les bobines.

On comprend donc par ces divers exemples le bobinage d'un alternateur bi- ou triphasé à  $n$  pôles.

En définitive, un alternateur polyphasé à bobinages fixes se compose :

1° D'un appareil inducteur à pôles animé d'un mouvement de rotation ;

2° D'un induit fixe sur lequel on a placé deux, trois ou plusieurs circuits distincts.

Nous allons donner quelques détails sur chacune de ces parties.

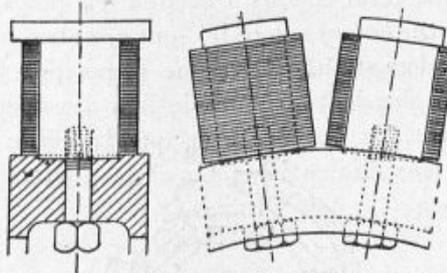
#### ÉTUDE SOMMAIRE DE L'INDUCTEUR MOBILE A POLES RADIANTS.

Cette pièce est en fonte douce cylindrique et porte sur sa périphérie un système de dents ou noyaux de fer doux équidistants. Deux cas se présentent dans la pratique suivant que ces noyaux appartiennent à un même cylindre ou à deux cylindres distincts mais d'égal rayon et branchés sur le même arbre.

Dans le premier cas les noyaux sont entourés de bobines (*fig. 41*) ou quelquefois d'un simple ruban de cuivre, l'enroulement étant tel

que sous l'action d'un courant excitateur extérieur les noyaux soient

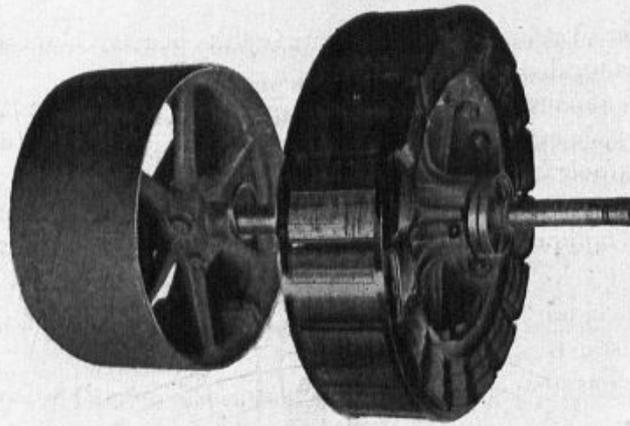
Fig. 41.



Coupe des pôles radiants dans un alternateur polyphasé.

transformés en pôles alternativement de sens contraire, ce que nous indiquons par le schéma de la figure 42; cette disposition est souvent désignée par le qualificatif d'*alternateurs à pôles radiants*.

Fig. 42.



Inducteur mobile de l'alternateur Farcot.

Le deuxième dispositif comprend deux disques plats à dents périphériques, branchés sur le même arbre et séparés par la bobine excitatrice; l'enroulement du fil de cette dernière est tel que, parcourue par un courant, elle transforme les dents de chaque disque en pôles de même nom pour chacun d'eux, de sorte que dans ce cas le fer tournant est formé par une double couronne de pôles, l'une ne comprenant que des pôles nord et la deuxième que des pôles sud.

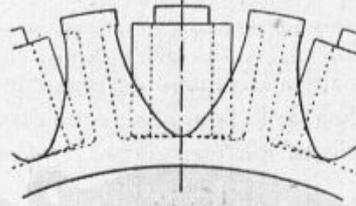
M.

4

Cette disposition nécessitera évidemment pour l'induit une double couronne de bobines ou deux circuits décalés d'un angle convenable, l'un de ces circuits étant soumis à l'action des pôles N et l'autre à l'action des pôles S.

On conçoit également une troisième disposition de l'inducteur mobile obtenue en décalant les pôles de l'un des disques dans le fer tournant précédent, de manière à ce que la saillie de l'un d'eux corresponde au creux du deuxième. On obtient alors l'aspect indiqué

Fig. 43.

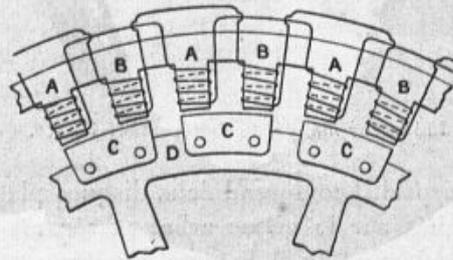


par la figure 43 et les bobines des deux induits peuvent alors se trouver placées parallèlement les unes aux autres.

Il peut enfin arriver que dans les dispositions précédentes tous les pôles soient de même nature; la machine prend alors le nom d'*alternateur unipolaire* ou *homopolaire*.

Signalons enfin la structure spéciale du fer tournant de la machine Kingdon, indiquée par la figure 44. Dans le schéma figuratif les

Fig. 44.



Machine alternatrice Kingdon.

bobines B recueillent les courants alternatifs produits par la rotation de pièces de tôle C influencées par les bobines inductrices A.

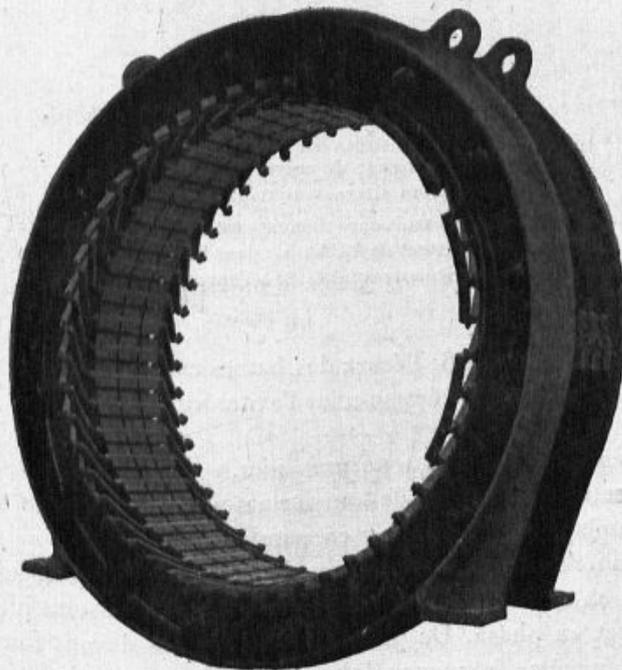
**Étude sommaire de l'induit fixe d'un générateur polyphasé à fer tournant.**

C'est une couronne de fonte, feuilletée normalement à l'axe concentrique au fer tournant dont elle n'est séparée que par un *entrefer* de quelques millimètres.

Sur tout le pourtour de la périphérie interne se trouvaient pratiquées un certain nombre de rainures ou encoches variable avec la nature du courant polyphasé que l'on veut obtenir et le nombre de pôles inducteurs.

Dans ces rainures on place, soit des bobines enroulées individuel-

Fig. 45.



Organe fixe de l'alternateur triphasé Farcot.

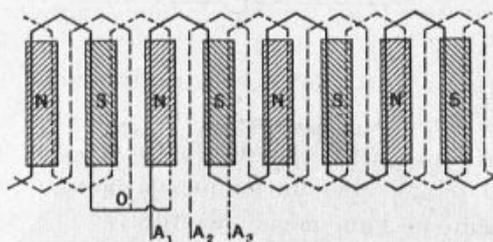
lement sur gabarit, soit des barres massives en cuivre que l'on réunit en deux ou trois groupes suivant que le générateur est biphasé ou triphasé.

Nous donnons (*fig. 45*) la perspective de l'induit dans un alternateur triphasé H. Farcot.

Rappelons que le nombre de barres est en rapport avec le nombre des pôles inducteurs; c'est ainsi qu'avec 32 pôles inducteurs placés sur une même couronne d'alternateur biphasé à fer tournant, il faudra 96 barres et, par suite, 96 trous ou rainures seront pratiqués dans le noyau de l'induit.

Nous obtiendrons dans ce cas trois circuits distincts en zigzags, chacun d'eux étant formé de 32 barres conductrices reliées comme

Fig. 46.



Correction des barres de cuivre de l'induit fixe dans un alternateur triphasé.

*Note* : Le départ des trois enroulements est en O, point mort; les fils de ligne partent de  $A_1, A_2, A_3$ ; dans le cas de la figure la force électromotrice correspondante à l'enroulement moyen  $A_2$  est nulle.

l'indique notre figure 46; l'écart des barres est d'ailleurs déterminé par le nombre de pôles comme nous l'avons vu page 48.

*Couplage des machines polyphasées.* — L'élévation de la tension s'effectuant au moyen de transformateurs spéciaux, on n'utilise que le couplage en quantité ou en parallèle.

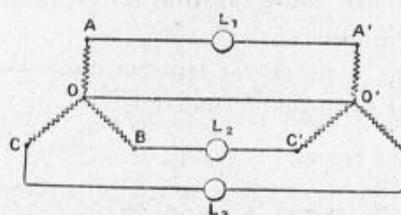
Mais on ne doit réunir les bornes de machines polyphasées que si elles sont en concordance exacte, c'est-à-dire si elles sont identiques en signe et en phase. De plus, les génératrices devant fournir des courants de même fréquence doivent faire par minute des nombres  $N$  et  $N'$  de tours inversement proportionnels au nombre de leurs pôles respectifs.

En définitive, au moment du couplage il doit y avoir identité physique entre les génératrices et les bornes.

On peut déterminer le moment de la concordance de phase au moyen de dispositions diverses.

Dans la méthode *Siemens* on relie deux à deux les bornes et les points neutres des deux alternateurs montés en étoile ainsi que l'in-

Fig. 47.



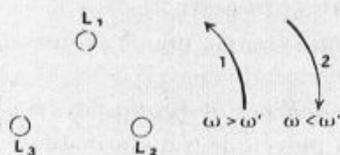
diqué la figure 47; puis, sur les conducteurs reliant les bornes, on place les trois lampes  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  indiquées.

Il est à prévoir que l'éclat de chacune d'elles passera par un maximum à des intervalles de temps constants, décalés pour deux lampes consécutives d'une même quantité.

Deux cas sont possibles, suivant que la vitesse angulaire  $\omega$  du premier alternateur est supérieure ou inférieure à la vitesse  $\omega'$  du deuxième.

Supposons  $\omega > \omega'$  et disposons les trois lampes  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  en triangle, nous verrons alors le maximum d'éclat tourner dans le sens

Fig. 48.



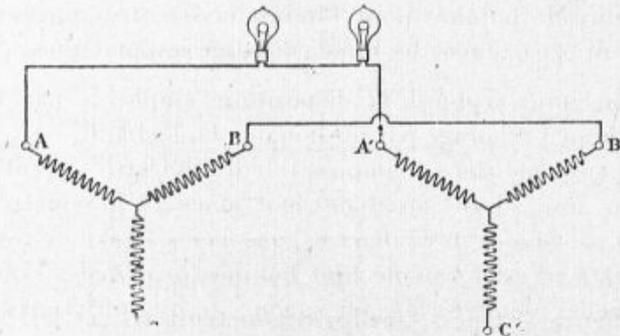
indiqué par la flèche 1 de la figure 48; il tournera, au contraire, suivant la flèche 2 si  $\omega < \omega'$ .

Enfin, dans le cas où la synchronisation est exacte, les trois lampes s'allument et s'éteignent en même temps et il y a coïncidence de phase au moment même de l'extinction, ce qui permet dans la pratique de n'employer qu'une seule lampe indicatrice.

Une seconde disposition possible du *synchronoscope* nous est indiquée par la figure 49, dans laquelle deux lampes séries sont

reliées à l'une des bornes de chaque générateur supposé également monté en étoile; deux des autres bornes étant réunies directement.

Fig. 49.



Indicateur de phase dans le couplage des alternateurs.

En général, l'éclat des lampes sera variable, et au moment de leur extinction il y aura la concordance de phase cherchée.

Le couplage des alternateurs étant réalisé, il est nécessaire, si l'on ne veut pas que les induits débitent les uns sur les autres, que chaque machine couplée travaille avec le même facteur de puissance  $\cos \varphi$ .

On doit à Doliw Dobrowolski (1) un appareil pratique à indicateur mobile nous donnant directement  $\cos \varphi$  que l'on pourra faire varier au moyen de rhéostats appropriés.

Ajoutons enfin que, dans le cas des hautes tensions, on place les lampes sur les secondaires d'appareils transformateurs étudiés dans la suite.

*Qualités mécaniques des alternateurs modernes.* — L'alternateur polyphasé est, le plus ordinairement, actionné par une turbine, et l'axe de rotation est vertical; si cet axe est horizontal, il y aura avantage à employer la machine à vapeur.

La plupart du temps on adjoindra au système mobile induit ou inducteur un volant qui, augmentant le moment d'inertie de ce système, en régularisera la marche. On peut comparer les machines

(1) *Electricien*, 2<sup>e</sup> série, t. XVI, *Phasemètre de Doliw-Dobrowolski*.

modernes à un grand nombre de points de vue, nous ne retiendrons que les suivants :

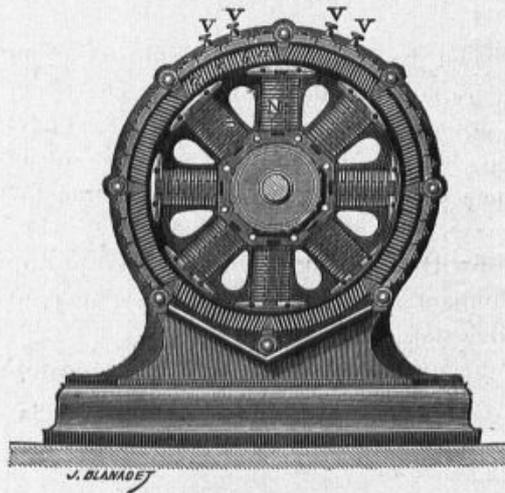
- 1° Puissance et tension aux bornes;
- 2° Nombre de pôles inducteurs, nombre de tours et fréquence;
- 3° Nombre de bobines pour l'induit massé et nombres de barres pour l'induit réparti avec les dimensions correspondantes.

Rappelons tout d'abord la disposition employée par Gramme, dès 1877, pour l'éclairage par les bougies Jablochkoff.

L'*inducteur mobile* se composait de huit électro-aimants alternés excités par une source auxiliaire leur amenant le courant continu nécessaire par le moyen de deux bagues fixées à l'axe de rotation.

L'*induit fixé* est formé de huit bobines principales symétriques, chacune d'elles étant formée elle-même de quatre torons ou hélices

Fig. 50.



Machine Gramme, à courants polyphasés, construite en 1877.

partielles *a*, *b*, *c*, *d* que l'on voit sur la gauche et à la partie supérieure de la figure 50.

On réunit entre elles toutes les hélices telles que *a*, puis les hélices telles que *b*, etc., de telle sorte qu'on obtient ainsi autant de circuits indépendants que d'hélices partielles.

Lorsque la couronne de pôles inducteurs tourne, chacun de ces circuits sera le siège de courants alternatifs, et comme ils se succèdent

l'un à l'autre à des intervalles de temps réguliers, ces courants seront identiques entre eux mais décalés d'une quantité constante.

Gramme construisit ainsi des machines à 12 circuits indépendants dont chacun pouvait entretenir 5 bougies électriques.

Il avait trouvé ainsi les courants polyphasés mais ne sut pas les utiliser.

Nous résumons enfin ci-dessous les qualités principales des alternateurs polyphasés les plus employés dans ces dernières années; ces machines sont, d'ailleurs, à bobinage fixe.

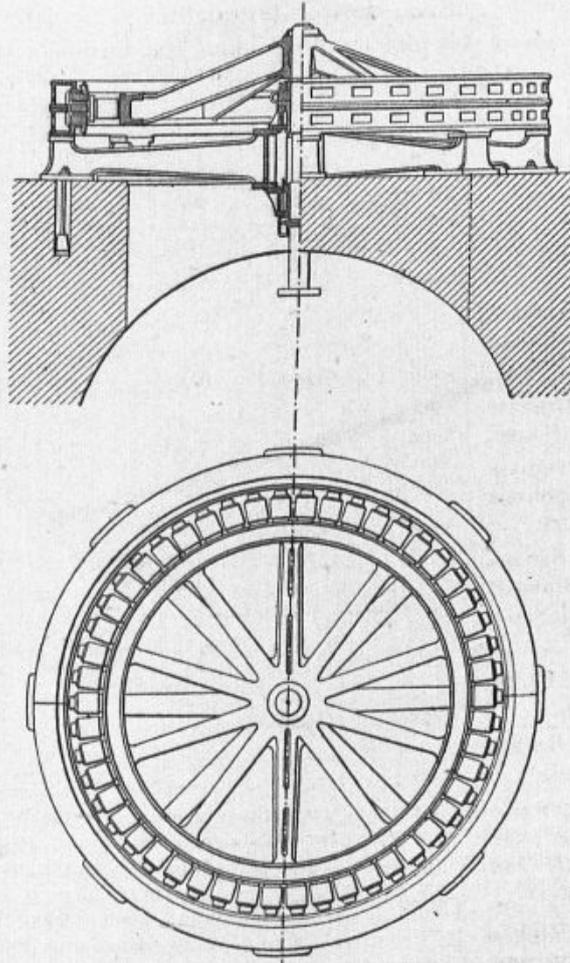
	Puissance de la machine en kilowatts,	Tension aux bornes.	Diamètre du noyau.	Nombre de pôles inducteurs.	Fréquence.
Alternateur diphasé du Niagara.....	3500	2300	3,04 <sup>m</sup>	12	25
Alternateur triphasé Siemens et Halske (1900).....	2000	2200	6	72	50
Alternateur triphasé de l'A.E.G. <sup>(1)</sup> 1900.	3000	6000	7,44	72	50
Alternateur triphasé du Métropolitain de New-York ....	3500	6600	5	40	25
Alternateur Farcot- Leblanc diphasé, de l'usine de Saint- Ouen.....	880	2200	5,51	32	42
Alternateur Farcot triphase.....	1280	3000	7	32	50
Alternateur Brown, de l'Exposition de Francfort.....	210	50	1,76	32	40
Alternateur triphasé de la <i>Société lyon- naise</i> .....	950	3500	»	50	50
Alternateur triphasé Grammont (1900).	600	»	5	64	50
Alternateur triphasé Gramme.....	500	5000	3	20	25

(<sup>1</sup>) A. E. G. (Allgemeine Electricität Gesellschaft).

Rappelons que le nombre de tours de l'inducteur mobile se déduit des chiffres donnés dans les deux dernières colonnes, par application de la formule

$$\text{Nombre de tours} = \frac{60 \times \text{fréquence}}{\text{paires de pôles}}$$

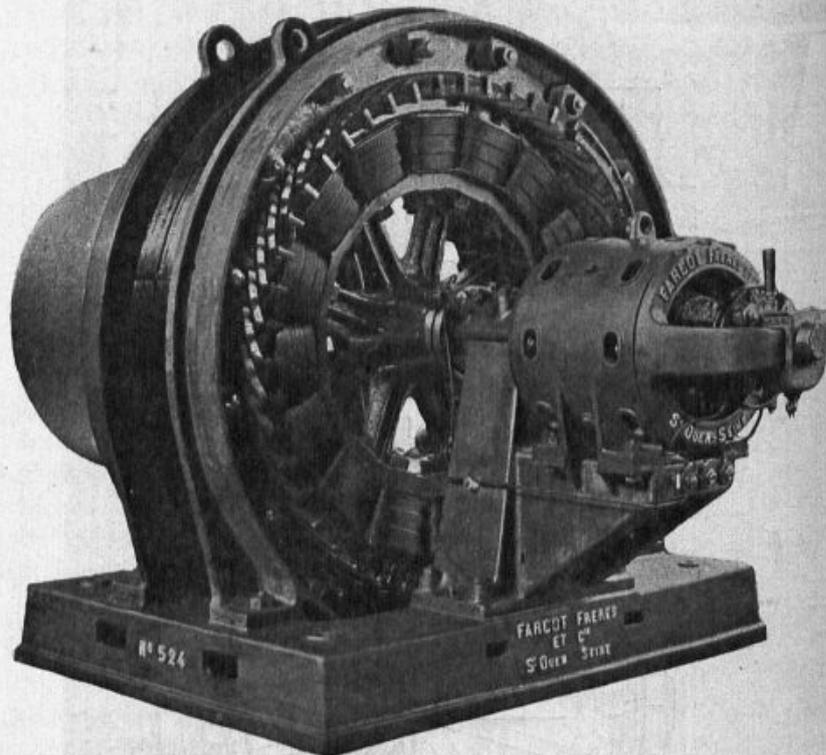
Fig. 51.



Machine Brown, triphasée (modèle 1900), à 50 pôles inducteurs.  
*Note :* Cette génératrice à axe vertical engendre un courant triphasé de 3500 volts et de 50 périodes par seconde; son inducteur mobile fait 120 tours par minute. L'induit, à enroulement en tambour, est placé dans 150 trous circulaires à la périphérie intérieure.

Nous donnons ci-contre avec légende explicative quelques coupes et perspectives des machines Brown de la Société des forces motrices du Rhône, des machines Farcot de l'usine de Saint-Ouen, et des alternateurs de la maison Gramme de Paris.

Fig. 52.

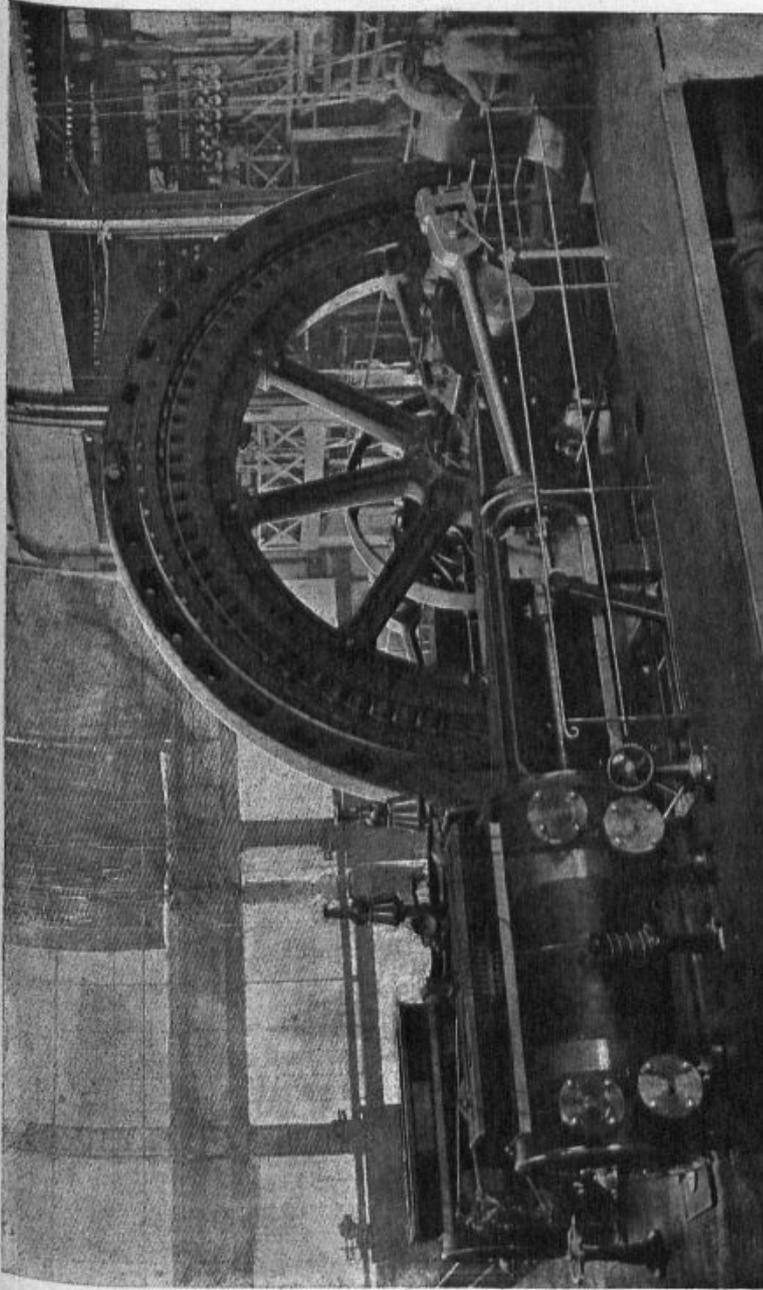


Machine triphasée de l'usine Farcot (1).

*Note :* Cette machine a une puissance de 200 kilowatts sous 190 volts; son inducteur mobile représenté à part, page 49, a 16 pôles radiants, il est en tôles feuilletées et chaque pôle y est muni de l'enroulement amortisseur Leblanc à barres parallèles à l'axe de rotation et reliées à leurs extrémités par deux cercles de cuivre. Le nombre de tours est de 375 à la seconde et le diamètre de l'induit fixe est de 1<sup>m</sup>,50. Sur la figure on aperçoit à la partie antérieure l'excitatrice des pôles inducteurs.

(1) Nous remercions vivement MM. les Directeurs de la Société Gramme et de la Compagnie H. Farcot de leur obligeance à nous prêter ces quelques clichés.

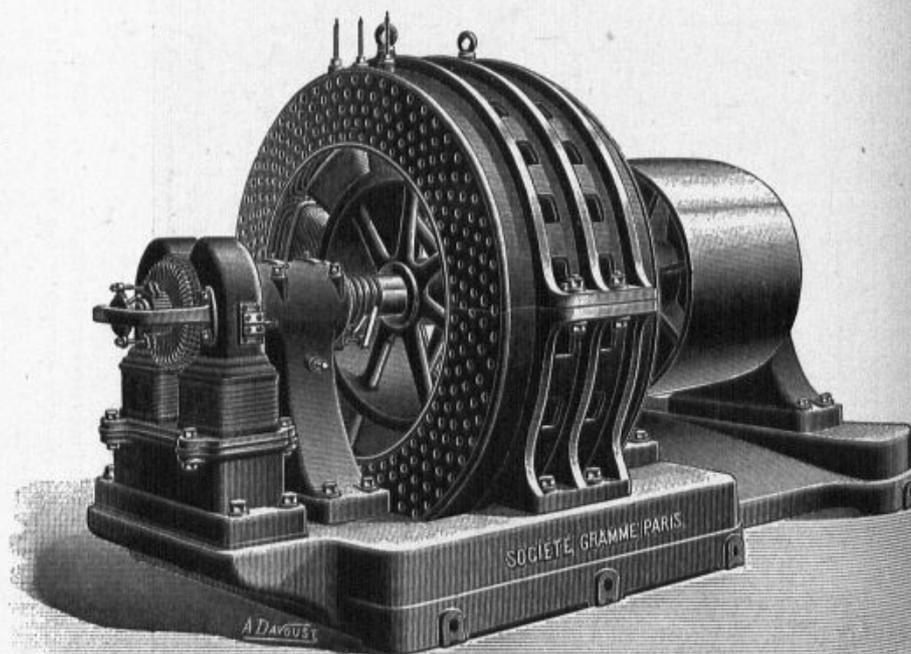
Fig. 53.



Machine triphasée de l'usine Farcot.

Note : Cet alternateur triphasé est de 1280 kilowatts sous 50 périodes et 3000 volts; l'inducteur mobile est à 32 pôles radiants, son diamètre est de 7<sup>m</sup>. L'inducteur y est muni de l'amortisseur Leblanc, constituant une véritable cage protectrice, très utile dans la marche d'alternateurs en parallèle et agissant comme amortisseur des oscillations de phase.

Fig. 54.



Alternateur volant Gramme.

*Note* : La puissance est de 500 kilowatts; l'inducteur mobile y possède 120 pôles et fait 150 tours par seconde.

A la partie gauche de la figure se trouve l'excitatrice des pôles radiants; à droite on aperçoit la poulie de commande et à la partie supérieure les trois bornes d'où partent les fils de ligne.

En général le rendement est de 90 pour 100; il y a lieu de tenir compte des pertes d'énergie dans l'induit et l'inducteur par effet Joule, des pertes dans le fer et des frottements.

Quant à l'excitatrice, dont la puissance est ordinairement égale à 3 pour 100 de celle de l'alternateur, son rendement est d'environ 35 pour 100.



---

## CHAPITRE IV.

### MOTEURS POLYPHASÉS.

---

#### MOTEURS MONOPHASÉS.

Il nous a paru nécessaire de décrire succinctement tout d'abord les moteurs monophasés ou alternatifs.

On les divise en deux groupes : les moteurs synchrones et les moteurs asynchrones ou d'induction.

*Moteurs synchrones monophasés.* — Le principe en est facile à comprendre : recevons dans un cadre mobile autour d'un axe vertical, un courant alternatif, en employant un système de deux bagues isolées et plaçons un pareil cadre dans un champ constant qui nous sera fourni soit par les pôles N et S de deux électro-aimants, soit par tout autre moyen.

Nous réalisons ainsi en quelque sorte la contre-partie de notre expérience fondamentale du cadre tournant.

Or, le courant alternatif transforme le cadre en un aimant temporaire et y produit un couple variable en intensité et en direction.

En sorte que ce cadre soumis à des couples alternativement de sens contraire oscillera autour d'une position moyenne, le nombre des oscillations doubles étant égal à la fréquence du courant alternatif : on n'obtiendra donc, en général, que des oscillations très rapides.

Imaginons maintenant le cadre animé par un moyen mécanique, et au début de l'expérience, d'une vitesse de rotation égale à la pulsation du courant, cet appareil mobile se trouvera, par rapport au champ fixe, dans la même situation au début et à la fin de la période, de telle sorte que le couple moteur ayant une direction constante le cadre tournera.

Or, dans l'intervalle d'une période, le courant alternatif change de sens à la demi-période. Il faudra donc, pour obtenir le mouvement d'un cadre parcouru par un courant alternatif et soumis à l'action d'un champ fixe, réaliser les deux conditions suivantes :

1° On devra faire en sorte que, avant de lancer le courant, le cadre soit animé d'une vitesse de rotation lui faisant un nombre de tours égal au nombre d'alternances ;

2° Il faudra, dans le cadre mobile, changer la direction du courant alternatif exactement après une demi-révolution de ce cadre.

Dans ces conditions, le couple moteur auquel il est soumis aura une direction et une valeur constantes.

Un pareil moteur ne démarrera donc pas tout seul ; il faudra lui communiquer au préalable une vitesse angulaire égale à la pulsation du courant et ce n'est que lorsque cette vitesse sera obtenue que l'on pourra lancer dans ce moteur le circuit alternatif qui maintiendra le mouvement.

Ce que nous venons de dire pour le cadre tournant se répète évidemment pour tout appareil producteur d'alternatif, ce qui nous permet d'énoncer la remarque suivante :

*Les alternateurs monophasés sont réversibles et portent alors le nom de moteurs synchrones.*

Au moteur synchrone monophasé se rattache intimement l'appareil connu sous le nom de *commutateur monophasé* ou *convertisseur*, nous l'étudions page 94, Chapitre V, dans le groupe général des moteurs dynamo.

Faisons remarquer de plus que tout moteur à courant continu peut être alimenté par de l'alternatif, puisque la direction du courant et celle du champ y changeront en même temps : on désignera un tel appareil sous le nom de *moteur monophasé à collecteur*.

*Moteurs monophasés asynchrones.* — Ils consistent essentiellement en un induit mobile autour d'un axe de rotation et soumis aux actions inductives d'un champ alternatif ; l'enroulement en est fermé sur lui-même. Si cet induit est primitivement au repos au moment de l'excitation du champ, il est évident que le couple auquel il sera sou-

mis pendant une période sera rigoureusement nul; supposons-le, au contraire, animé d'une certaine vitesse angulaire, il s'y produira des courants d'induction et des considérations théoriques nous montreraient que le couple moteur y est proportionnel, d'abord à la vitesse initiale donnée à la partie mobile, puis à la différence existant entre cette vitesse et la pulsation du courant, c'est-à-dire au glissement. En conséquence, au repos le couple moteur sera nul et, par suite, le moteur ne démarrera pas tout seul; nous aurons également une valeur nulle pour ce couple si les deux vitesses angulaires sont égales, ce qui exige l'absence de synchronisme et explique le qualificatif d'*asynchrone*.

On pourra obtenir automatiquement le démarrage d'un tel moteur en utilisant les différences de phase que produisent une résistance, une self-induction ou une capacité dans une partie du circuit parcouru par un alternatif.

Mais, dans ces conditions, le circuit monophasé peut être considéré comme parcouru par deux courants alternatifs décalés et le moteur peut alors se classer parmi les moteurs polyphasés asynchrones.

## MOTEURS POLYPHASÉS.

On peut également les diviser en synchrones et asynchrones.

*Moteurs synchrones.* — Nous n'avons que quelques mots à dire pour expliquer le mécanisme des premiers.

Reportons-nous à ce qui a été dit sur les alternateurs polyphasés à bobinage fixe : on y voit que le mouvement de rotation d'une couronne de pôles produit dans le circuit induit des courants polyphasés.

Il est donc possible de prévoir que, réciproquement, si l'on anime cet induit fixe par des courants polyphasés extérieurs, le mouvement de rotation de la couronne polaire sera rigoureusement entretenu; il est toutefois nécessaire que ce mouvement existe avant que l'action des courants polyphasés y puisse se produire.

Autrement dit, un pareil moteur ne démarrera pas en charge.

Des considérations identiques s'appliqueront au cas des alternateurs à induit mobile : si dans un de ces induits, animé au préalable d'une certaine vitesse de rotation, on lance les courants polyphasés, ce mouvement de rotation sera entretenu par la réaction entre le

champ tournant qu'ils engendrent et les pôles de l'inducteur fixe excités par un courant continu auxiliaire.

D'une façon générale, tout alternateur polyphasé peut se transformer en moteur synchrone correspondant, c'est-à-dire en un moteur exigeant la mise en marche de la partie mobile avant la production du champ tournant caractérisant le système polyphasé, pour un démarrage en charge.

En conséquence, toutes les considérations sur la relation entre le nombre des pôles inducteurs et la fréquence des générateurs polyphasés se retrouveront par suite de la réversibilité entre le nombre des pôles inducteurs et la vitesse de la rotation du moteur.

C'est ainsi que, pour un moteur synchrone biphasé à deux pôles et à deux bobines par phase, on obtiendra un nombre de tours égal au nombre d'alternances. Au contraire, pour le même moteur à quatre bobines par phase, la vitesse sera réduite de moitié; à six bobines par phase elle sera égale au tiers (*fig. 55*).

Fig. 55.

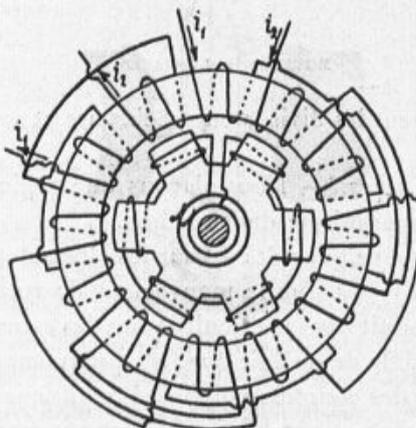


Schéma d'un moteur biphasé synchrone.

*Note* : Chaque courant biphasé traverse 6 bobines séries; la vitesse du moteur synchrone sera égale au tiers du nombre d'alternances; ce moteur démarre à vide, mais non en charge.

Remarquons enfin qu'il serait possible d'étudier comme moteur synchrone polyphasé tous les convertisseurs rotatifs dont nous exposons la marche page 88, Chapitre V.

## MOTEURS ASYNCHRONES OU D'INDUCTION.

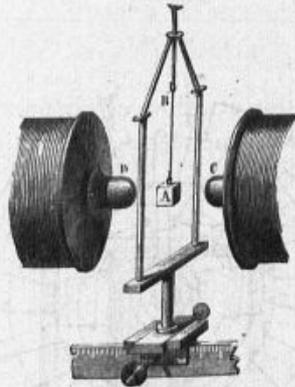
Ces moteurs sont ainsi appelés de ce fait que leur vitesse angulaire de rotation est différente de celle du champ tournant inducteur; nous verrons de plus (p. 72), qu'elle doit lui être toujours inférieure.

Pour en bien comprendre le mécanisme nous rappellerons les expériences principales connues sur le magnétisme de rotation.

En 1824, Gambey constate que les oscillations d'une aiguille aimantée diminuent rapidement d'amplitude si l'on place au-dessous un disque de cuivre.

Faraday (1825) réalise l'expérience contraire en arrêtant la rotation d'un cube de cuivre suspendu à un fil tordu, dès qu'il actionne les pôles d'un puissant électro-aimant (*fig. 56*).

Fig. 56.



Expérience de Faraday.

Arago (1824) <sup>(1)</sup>, par la rotation rapide d'un disque de cuivre, entraîne dans le mouvement du disque une aiguille aimantée placée parallèlement (*fig. 57*).

Babbage et Herschel en 1825 <sup>(2)</sup>, en produisant la rotation des pôles d'un puissant aimant, animent d'un mouvement analogue un disque de cuivre mobile sur un pivot central; on peut répéter cette

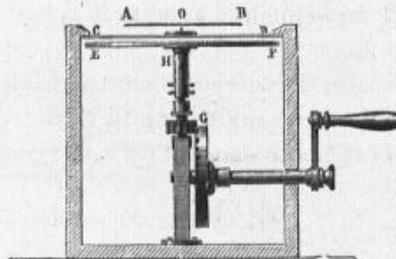
<sup>(1)</sup> ARAGO, *Ann. de Chim. et de Phys.*, 2<sup>e</sup> série, t. XXXVIII, p. 325.

<sup>(2)</sup> HERSCHEL et BABBAGE, *Philosophical Transactions*, 1825.

expérience en remplaçant l'aimant par un solénoïde (*fig. 58*). En sorte que nous pouvons résumer ces actions en disant :

*Toutes les fois que dans un système, formé par une masse métallique et un aimant ou un solénoïde, il y a un déplacement quelconque, il se produit une force ayant tendance à empêcher le mouvement du corps qui se déplace ou à provoquer le déplacement de celui qui reste au repos.*

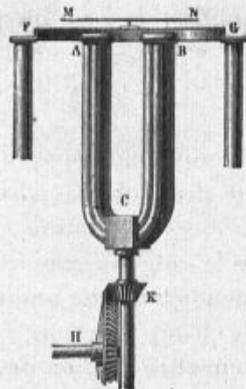
Fig. 57.



Expérience d'Arago.

A quelle cause devait-on attribuer ce phénomène? Faraday montra qu'il rentrait dans les lois générales de l'induction et qu'il se produi-

Fig. 58.



Expérience de Babbage et Herschel.

sait dans les masses métalliques en mouvement devant un pôle d'aimant des courants à trajectoire fermée dont l'action électrodynamique tendait à empêcher le mouvement des masses.

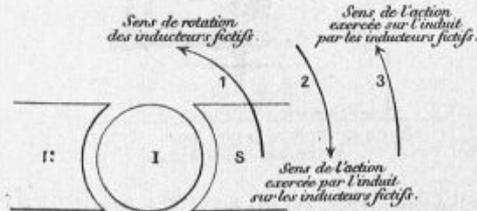
Matteucci (1) put d'ailleurs constater sur les disques en mouvement la direction de ces courants parasites.

En résumé, l'action réciproque d'une masse métallique et d'un pôle ou, plus généralement, d'un champ magnétique en mouvement, est une conséquence de la loi de Lenz.

On peut, toutes ces actions générales étant rappelées, prévoir la rotation d'une masse métallique sous l'action d'un champ tournant.

En effet, supposons ce champ tournant produit par la rotation des pôles N et S d'un inducteur fictif et soit 1 la direction de rotation; il est évident que les courants d'induction produits dans la pièce mobile I réagiront de manière à empêcher le mouvement du champ et

Fig. 59.



que, par suite, l'action de l'induit sur les inducteurs fictifs sera dirigée suivant la flèche 2 (fig. 59).

En définitive, et par application du principe de l'égalité de l'action et de la réaction, le couple exercé sur l'induit par les inducteurs fictifs sera dirigé suivant la flèche 3, c'est-à-dire suivant la rotation même du champ.

C'est Walther Baily (2) qui, le premier, obtint la rotation du champ magnétique en donnant des polarités diverses à quatre électro-aimants et put produire ainsi la rotation continue d'un disque de cuivre horizontal.

Son expérience fut bientôt oubliée, et il nous faut arriver, pour obtenir définitivement le champ tournant, aux recherches suivantes :

Pour réaliser pratiquement la rotation de l'induit, Ferraris (3) lui donne la forme d'un cylindre massif en cuivre mobile autour de l'axe

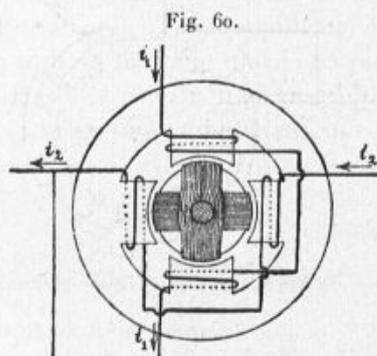
(1) MATTEUCCI, *Ann. de Chim. et de Phys.*, 3<sup>e</sup> série, t. XXXIX, 1853.

(2) WALTHER BAILY, *Physical Society of London*, 1879.

(3) FERRARIS, *Rotazioni elettrodinamiche* (Acad. de Turin, mars 1888).

même du champ tournant qu'il créait en faisant parcourir deux bobines rectangulaires par les courants décalés.

Tesla (<sup>1</sup>) enroule les bobines productrices de ce champ autour de pôles saillants que présente une armature cylindrique constituée par un système de feuilles de tôle (*fig. 60*).



Moteur biphasé asynchrone Tesla.

Sur un anneau concentrique, on a placé à angle droit deux bobines de fils conducteurs isolés dont l'enroulement est fermé sur lui-même.

La puissance d'un tel moteur est évidemment très faible; aussi a-t-on modifié la construction et l'enroulement du *stator* ou partie fixe, et du *rotor* ou partie mobile, d'après les considérations générales que nous allons exposer.

#### ÉTUDE ET BOBINAGE DU STATOR DANS UN MOTEUR POLYPHASÉ.

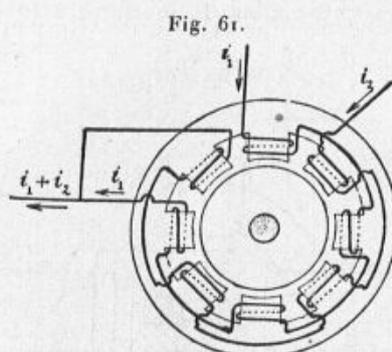
Dans les premiers moteurs, cet organe se composait d'un anneau en tôles feuilleté normalement à l'axe et muni, sur sa périphérie interne, d'un certain nombre de saillies pouvant être transformées, grâce à un enroulement spécial, en autant de pôles alternés.

Nous donnons (*fig. 61*) le schéma d'un stator biphasé à huit pôles alternés, c'est-à-dire à quatre bobines par phase.

Dans un pareil moteur, le champ tournant fait un angle de  $45^\circ$  pour  $\frac{1}{4}$  de période des courants inducteurs, c'est-à-dire deux tours par période.

(<sup>1</sup>) NICOLAS TESLA, Brevets américains, octobre 1887.

Ce premier dispositif a été modifié comme il suit :  
On pratique, au voisinage immédiat de la surface interne de l'organe fixe, une série de trous le traversant complètement suivant

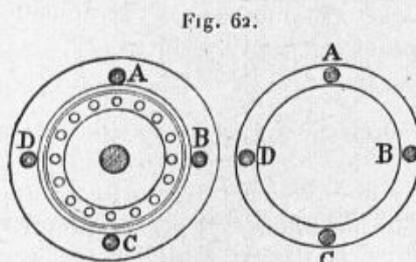


Moteur asynchrone biphasé à 8 pôles.

les génératrices; ces trous ou rainures sont au nombre de quatre au minimum pour les biphasés, de six au minimum pour les triphasés.

Dans chacun d'eux on place une barre de cuivre. Les barres, libres à une de leurs extrémités, sont réunies métalliquement entre elles à l'autre.

On constitue ainsi deux ou trois bobines que les courants excitateurs parcourront; dans la figure 62 correspondant aux biphasés, les



Note : L'un des courants biphasés entre par A et sort par C;  
le deuxième entre par B et sort par D.

courants entreront par A et B et sortiront par C et D; de même, dans la figure 63 relative aux triphasés, les courants décalés de  $\frac{1}{3}$  de période parcourront les bobines AD, BE, CF constituées par les barres de cuivre prises deux à deux.

Pratiquement, on a intérêt à augmenter le nombre des barres par-

courues par un même courantphasé inducteur; c'est ainsi que, dans le moteur Brown triphasé, le nombre total des barres de cuivre est de 54, soit 18 par phase.

Elles sont réunies entre elles de manière à former trois groupes

Fig. 63.

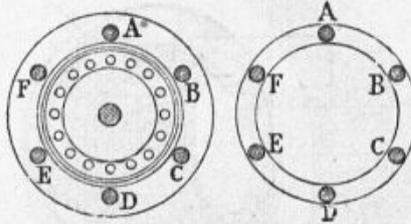


Schéma d'un moteur triphasé à cage d'écureuil.

Note : 6 fils de ligne seront nécessaires pour l'excitation.

distincts de cales angulairement de  $60^\circ$ ; nous en représentons en coupe l'enroulement dans la figure 64; on voit dans ce schéma les

Fig. 64.

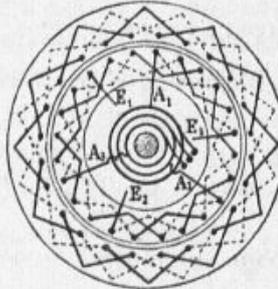


Schéma du moteur triphasé Dobrowolsky-Brown.

Note : L'inducteur est intérieur à la partie mobile ou armature.

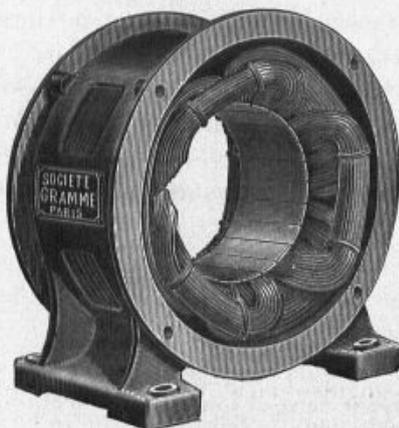
trois extrémités  $A_1, A_2, A_3$  aboutir à trois bagues isolées permettant l'arrivée des courants triphasés excitateurs; les autres extrémités  $E_1, E_2, E_3$  seront ou réunies directement ou reliées par une résistance convenable.

Théoriquement, un pareil enroulement revient à augmenter le nombre des pôles fixes de l'inducteur à saillies précédemment décrit. industriellement on se sert d'un stator dont les bobines formées de

fils soigneusement isolés à la micanite ont été construites sur gabarit.

Nous donnons (*fig. 64 bis*) la perspective du stator bobiné du moteur triphasé Gramme.

Fig. 64 bis.



Perspective d'un stator triphasé Gramme.

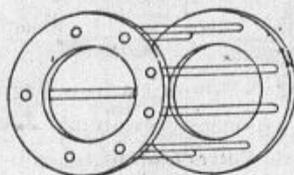
#### ÉTUDE SOMMAIRE DU ROTOR.

La disposition la plus généralement employée est celle dite à *cage d'écureuil*.

L'organe mobile y est formé d'un cylindre feuilleté normalement à l'axe et composé d'un certain nombre de disques minces en tôle douce.

Sur le cylindre ainsi constitué ou *noyau* de l'organe mobile, on a

Fig. 65.



Cage d'écureuil séparée de son noyau.

pratiqué un certain nombre de fentes parallèles aux génératrices, dans lesquelles on a placé des barres de cuivre soigneusement isolées du

noyau et que l'on réunit à leurs extrémités par deux couronnes de bronze, de telle sorte que, séparé de son noyau, le rotor rappelle une cage d'écureuil, circonstance qui lui a donné son nom : la figure 65 représente un tel induit.

Soumis à l'action d'un champ tournant, il démarre spontanément et prend un mouvement de rotation dont la vitesse angulaire est, ainsi que nous le verrons constamment inférieure à celle du champ.

Ce mouvement de rotation se produit quel que soit le bobinage de l'inducteur, autrement dit l'induit en *cage d'écureuil* possède la propriété intrinsèque de s'adapter sur des inducteurs d'un nombre indifférent de pôles, alors que les autres induits nécessitent un enroulage déterminé.

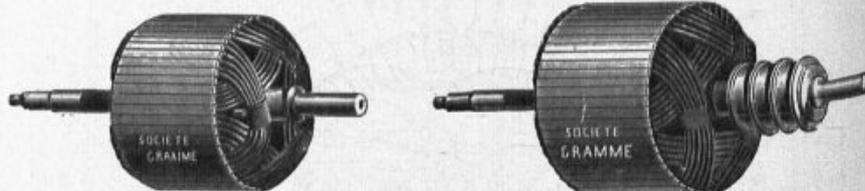
Sans entrer dans le détail des phénomènes d'induction dont la cage mobile est le siège, nous ferons remarquer que le courant produit dans chaque barre peut être considéré comme indépendant de celui des autres si l'on néglige la résistance des anneaux des extrémités, ce qui est réalisé puisque ceux-ci sont de forte section.

Le champ agit donc sur chacune de ces barres comme si elles étaient seules, et son action sur le courant qui la parcourt y produit une force électromagnétique ayant pour effet de la faire tourner autour de l'axe commun.

*Rotor bobiné.* — Dans le dispositif dit *en cage d'écureuil*, il y a une réelle difficulté à ajuster également les tiges de cuivre sur les bagues terminales.

Aussi de nombreux constructeurs ont-ils remplacé cet induit par

Fig. 66.



Rotors bobinés divers.

un autre analogue mais recouvert de fil, c'est-à-dire bobiné (*fig. 66*).

Le problème est le suivant :

*Un certain nombre de barres sont disposées sur la circonfé-*

rence d'un cylindre métallique dont elles sont isolées et soumises à un champ tournant. Quelle est la connection la meilleure pouvant être établie entre ces barres?

La solution de cette question paraît être aujourd'hui complètement résolue au point de vue pratique :

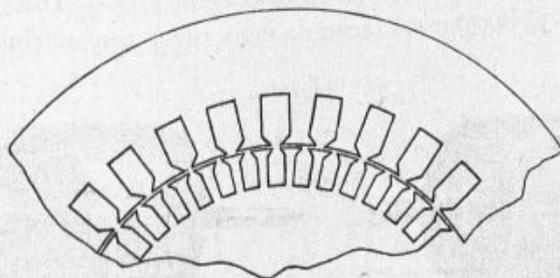
On réalise entre les barres de cuivre conductrices un certain nombre de circuits distincts, la plupart du temps trois. Ces circuits ont une de leurs extrémités aboutissant à un point commun, c'est-à-dire sont montés en étoile; l'autre extrémité de chaque circuit se termine à une bague isolée montée sur l'arbre.

Il est évident, d'ailleurs, que de nombreuses liaisons des barres métalliques sont possibles. Signalons celles qui peuvent être réalisées lorsque le nombre des barres est un multiple du nombre des pôles : elles consistent à introduire dans un même circuit toutes les barres dites homologues, c'est-à-dire se trouvant dans des situations identiques par rapport aux pôles inducteurs.

En définitive, dans les moteurs asynchrones modernes, l'inducteur comprend un certain nombre de barres, parfois des bobines parcourues par les courants excitateurs; quant à l'induit affectant la forme d'une cage d'écureuil, il peut être bobiné au non.

Enfin, le système inducteur et le système induit se trouvent placés

Fig. 66 bis.



Disposition des encoches dans un stator et un rotor polyphasé asynchrone.

dans des encoches de forme variable placées à la périphérie du stator et du rotor.

Nous donnons (*fig. 66 bis*) une coupe des cannelures dans un inducteur et un induit de moteur polyphasé.

## DÉMARRAGE ET MARCHE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE.

En fait, quand on lance dans le stator les courants excitateurs, nous avons en présence un champ tournant avec une vitesse considérable et l'enroulement en court circuit du rotor. Il se produira donc dans ce dernier des effets puissants d'induction qui, par réaction, affaibliront les courants inducteurs, affaiblissement forcément compensé par les générateurs alimentant les circuits polyphasés.

Tout revient à dire que, au début, le bobinage du stator sera parcouru par des courants dont l'intensité peut atteindre jusqu'à trois fois la valeur de la marche normale, circonstance qui peut évidemment provoquer des perturbations dans les fils de ligne.

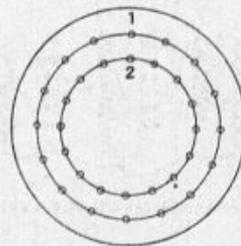
Pour éviter cet afflux de courant et augmenter le couple moteur au démarrage, il faut donner à l'induit mobile une forte résistance de début : c'est faire en sorte qu'il soit parcouru par des courants de faible intensité sensiblement égale à celle que le moteur absorbe en pleine marche et en produisant la même puissance.

A cet effet, il y a lieu de séparer l'induit en cage d'écureuil du rotor ou induit à bagues.

Dans le cas de l'induit en cage d'écureuil, on doit à M. Boucherot les élégantes et belles solutions suivantes supprimant l'emploi de toute bague ou frotteur :

1° *Emploi d'une double cage d'écureuil.* — Dans ce dispositif (*fig. 67*) le rotor est formé de deux cages concentriques l'une à

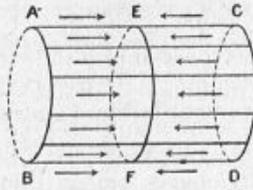
Fig. 67.



l'autre; la cage extérieure très résistante est, au début, seule sujette à l'action inductive des courants; le contraire a lieu lorsque la fréquence des courants induits dans le rotor diminue.

2° *Emploi d'une couronne médiane.* — La cage d'écurueil ordinaire est alors munie d'une couronne médiane très résistante EF (fig. 68) et, sur chacune des moitiés ainsi constituées, on fait agir

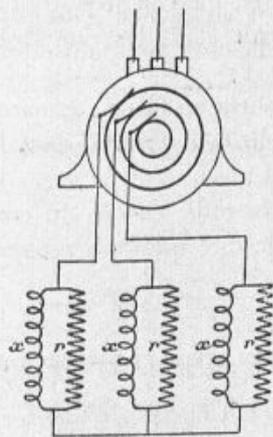
Fig. 68.



l'inducteur divisé en deux parties par un plan normal à l'axe du rotor, chacune de ces parties ayant été déplacée angulairement de  $\frac{90^\circ}{p}$  pour un inducteur à  $p$  paires de pôles. Il en résulte qu'au début les courants induits parcourent toute la couronne résistante, condition nécessaire du démarrage. On rétablit la coïncidence des deux moitiés de l'inducteur à la marche normale.

Pour un rotor à bagues on emploie les appareils appelés *rhéostats*

Fig. 69.



Rhéostat de démarrage de Fischer-Hinnen.

de démarrage; les plus usités sont ceux de Dobrowolsky, de Siemens et Halwske et de Fischer Hinnen.

Nous décrivons rapidement ce dernier que nous représentons schématiquement par la figure 69.

On voit par cette figure que le bobinage du rotor aboutit à trois bagues isolées permettant de mettre chaque section en communication avec une résistance  $r$  et une bobine de self-induction  $x$  dont l'effet est surtout très grand au démarrage, de telle sorte que, à ce moment, les courants se ferment par les résistances, alors que, dans la marche normale, le contraire a lieu dans les bobines de self-induction.

Le moteur démarré marche tout d'abord à vide et, comme le facteur de puissance  $y$  est relativement faible, l'énergie perdue par son mouvement n'est guère que la  $\frac{1}{20}$  partie de celle de la pleine charge.

Après adjonction de la charge qui ne doit pas dépasser une certaine limite, la vitesse du moteur diminue; on peut d'ailleurs augmenter cette diminution, soit au moyen d'un système d'engrenages, soit en augmentant le nombre des pôles du stator.

Il est quelquefois utile de renverser le sens de la marche du moteur; il suffira de produire une permutation dans l'ordre des fils de ligne pour les courants biphasés et dans deux seulement de ces fils pour le cas des courants triphasés.

Toutefois, de cette manière, il se produirait, au moment de la permutation, des courants considérables dans le bobinage des grands moteurs. Aussi se contente-t-on d'en produire l'arrêt mécaniquement par leur mise hors circuit et de les remettre en marche comme précédemment.

Terminons ces généralités en faisant remarquer qu'il est possible de faire tourner artificiellement l'induit dans le sens du champ et à une vitesse supérieure.

Dans ces conditions le rotor envoie du courant dans les fils de ligne et l'on convient de dire qu'il y a *récupération de l'énergie électrique*.

#### QUALITÉS MÉCANIQUES DE QUELQUES MOTEURS POLYPHASÉS MODERNES.

Nous avons vu qu'il était possible d'utiliser deux sortes d'induits.

Dans la pratique, le choix dépend de la puissance que l'on veut obtenir. Si cette puissance ne doit pas dépasser 4 kilowatts, la cage d'écurieil est amplement suffisante pour un démarrage immédiat; pour des puissances supérieures, on emploiera l'induit bobiné à bagues et rhéostat de démarrage.

Ajoutons enfin que, lorsque le rotor est démarré par un moyen

mécanique quelconque, il est toujours possible de se servir de la cage d'écurie quelle que soit la puissance.

Cette puissance fut d'abord très faible au début des recherches modernes; en effet, ce fut en août 1890 que M. Brown installait à Oerlikon un moteur triphasé d'environ 2<sup>ch</sup> dépourvu de collecteur et son appareil put alors être considéré comme le premier moteur polyphasé industriel.

Depuis M. Brown put arriver à donner à ses divers moteurs des puissances atteignant 1000<sup>ch</sup>.

Nous comparons dans le Tableau ci-contre quelques moteurs asynchrones actuellement employés :

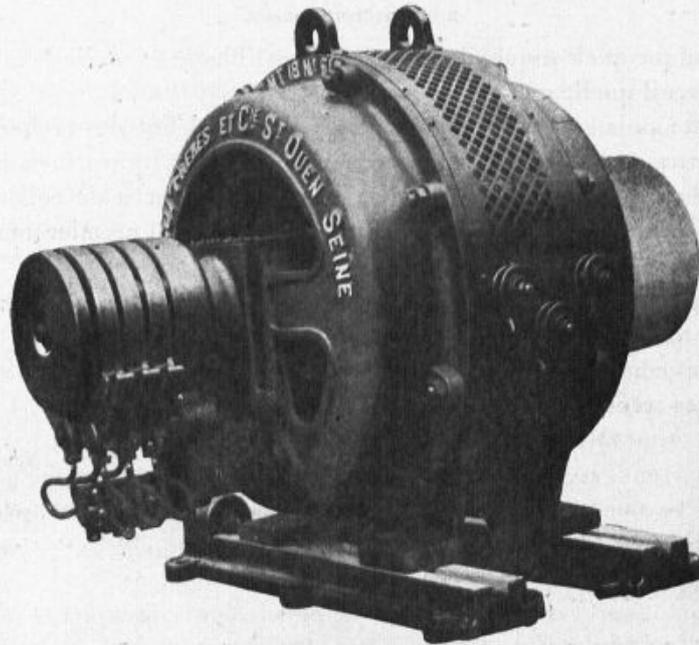
	Puissance en kilowatts.	Tension aux bornes.	Fréquence.	Nombre de pôles.
Moteurs triphasés d'Oerlikon (1897).	437 34 68	1900 190 3600	22,5 50 45	36 6 6
Moteurs polyphasés d'Esson (1897).	75 75	190 190	50 50	18 10
Moteurs triphasés de l'A.E.G. (1899).	» 37	» 500	» »	6 10
Moteur Brown di- phasé.....	740	2500	46	10
Moteur de la Wes- tinghouse C°....	375	400	60	36
Moteur asynchrone Alioth.....	375.	5000	25	30

Note : 1 kilowatt = 1,33 cheval.

Le rendement de ces divers moteurs est d'environ 0,9 pour une charge normale.

Nous donnons ci-contre les perspectives de quelques moteurs modernes de la Société Farcot de Saint-Ouen et de la Société Gramme de Paris.

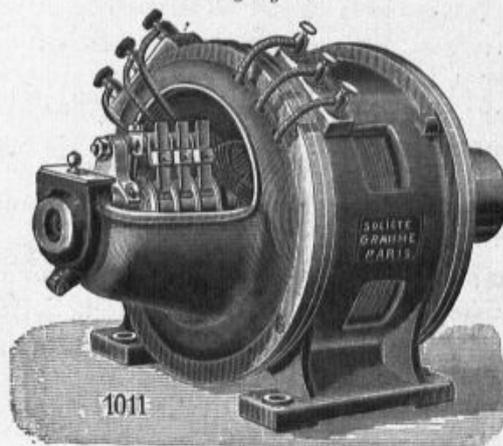
Fig. 69 bis.



Moteur triphasé Farcot.

*Note :* Cet appareil a une puissance de 375 kilowatts; son diamètre est de 2<sup>m</sup>,5 à l'alésage avec une épaisseur de fer de 33<sup>mm</sup>.

Fig. 69 ter.



Moteur Gramme triphasé.

*Note :* Ce moteur de 150 chevaux a 1<sup>m</sup> environ de diamètre. A la partie droite de la figure on voit les trois bornes pour l'amenée des courants triphasés; à la partie gauche trois autres bornes aboutissant au rhéostat de démarrage.

---

## CHAPITRE V.

### LES TRANSFORMATEURS DE TENSION, DE PHASE ET DE FRÉQUENCE.

---

#### TRANSFORMATEURS HOMOMORPHIQUES OU DE TENSION.

Nous venons d'étudier dans les Chapitres précédents les générateurs et les moteurs polyphasés. Or, dans la pratique, ces appareils ne peuvent être reliés directement dès qu'ils sont séparés par une assez grande distance et doivent être munis d'appareils spéciaux appelés *transformateurs de tension* ou plus simplement *transformateurs*.

Leur théorie repose sur le principe suivant, conséquence directe de la conservation de l'énergie :

*Si un circuit (1) ou primaire est parcouru par un courant de force électromotrice E et d'intensité I, on pourra obtenir, par induction dans un circuit (2) ou secondaire, un courant de force électromotrice E' et d'intensité I', tel que l'on ait sensiblement (fig. 70)*

$$EI = E'I'.$$

C'est à Gaulard (1) que l'on doit les premiers transformateurs industriels.

Pratiquement, les deux circuits sont enroulés sur une même monture métallique de telle sorte que, dans tout transformateur, il y a, en réalité, trois circuits à considérer :

- 1° Le circuit primaire ou inducteur;
- 2° Le circuit secondaire ou induit;
- 3° Le circuit magnétique, dont nous négligerons les effets dans la théorie élémentaire suivante.

Le rôle de l'appareil est très net : on anime le primaire d'un courant périodique d'intensité efficace ( $i_{\text{eff}}$ ) en maintenant à ses bornes

---

(1) GAULARD, 1883.

une différence de potentiel ( $e_{1\text{eff}}$ ), et l'on recueille au secondaire un courant périodique ( $i_{2\text{eff}}$ ) sous une tension efficace ( $e_{2\text{eff}}$ ).

Fig. 70.

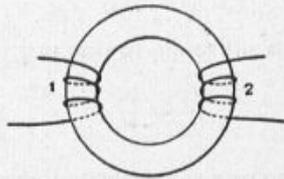


Schéma général d'un transformateur.

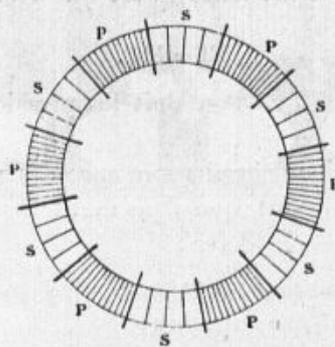
Si nous admettons qu'il n'y ait pas eu de perte dans la transformation de l'énergie, on aura

$$e_{1\text{eff}} \times i_{1\text{eff}} = e_{2\text{eff}} \times i_{2\text{eff}}.$$

Dans l'industrie, le transformateur se compose d'un noyau de fer feuilleté, afin d'éviter les courants de Foucault, sur lequel se trouvent enroulées la bobine primaire et la bobine secondaire; l'une de ces bobines est à gros fil et possède un petit nombre de spires; l'autre à petit fil et a un grand nombre de spires.

Prenons le cas le plus simple des transformateurs, celui où le

Fig. 71.



Disposition des bobines dans un transformateur à anneau.

primaire et le secondaire sont enroulés alternativement sur un anneau en forme de tore, ce qui lui a valu le nom de *transformateur à circuit magnétique fermé* (fig. 71).

Soient P le circuit primaire, S le circuit secondaire.

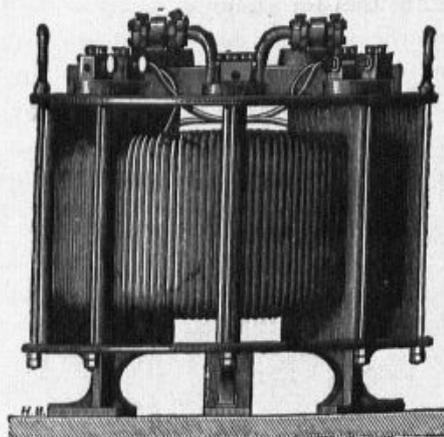
On sait, d'après les lois de l'induction, que les deux circuits, se trouvant placés dans le même champ magnétique créé par l'un d'eux, seront caractérisés par des forces électromotrices proportionnelles au nombre des spires qui les constituent.

En conséquence, si nous désignons par  $N_1$  le nombre des spires du primaire, par  $N_2$  le nombre du secondaire, on aura sensiblement

$$\frac{E_1}{N_1} = \frac{E_2}{N_2}.$$

Par suite, si nous voulons élever le voltage, il nous faudra augmenter  $\frac{N_2}{N_1}$ , c'est-à-dire prendre comme secondaire un fil comprenant plus de spires et, par suite, plus fin que celui du primaire. L'inverse aura lieu si l'on veut diminuer la tension. Comme transformateur

Fig. 72.



Transformateur Zypernowski.

*Note :* L'enroulement du primaire alterné avec celui du secondaire et les deux circuits aboutissent à des bornes fixes.

industriel à anneau, signalons celui de Zypernowski indiqué par la figure 72.

Leur construction nécessitant un travail pénible, car leur enroulement doit se faire à la main, on emploie actuellement d'autres modèles de construction plus facile dans lesquels on peut placer séparément les bobines primaires et secondaires.

M.

6

Tel est le transformateur à noyaux qui comprend comme partie essentielle un fer à cheval rectangulaire dont les deux branches sont réunies par un paquet de tôles isolées comprimées fortement sur la partie principale; la bobine primaire est placée sur la branche de droite et le circuit secondaire sur la branche de gauche.

On a ainsi constitué un circuit magnétique qui n'est pas parfait au sens technique du mot, car il y a un vide, petit il est vrai, entre la culasse et les deux noyaux. La puissance du primaire ne se retrouvera pas intégralement dans le secondaire et le rendement d'un tel appareil sera inférieur à celui d'un transformateur à anneau.

Aussi, pour obvier à cet inconvénient, a-t-on construit des appareils où les bobines primaires et secondaires sont, ou superposées ou concentriques, le noyau étant toujours en fer à cheval.

Enfin on emploie beaucoup le type connu sous le nom de *transformateurs cuirassés*; dans ce système, les bobines primaires et secondaires sont emboîtées sur un noyau de fer médian complété par

Fig. 73.

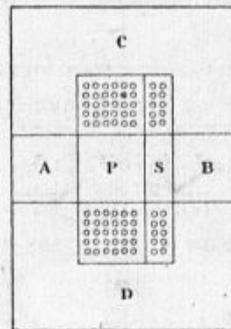


Schéma d'un transformateur cuirassé.

deux culasses en forme de U (*fig. 73*); l'enroulement est ainsi protégé contre les déprédations extérieures, d'où le nom de *cuirassé*.

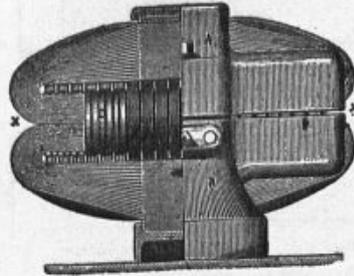
Comme spécimen de ce genre spécial nous décrivons le transformateur Ferranti.

*Transformateur Ferranti.* — Dans cet appareil (*fig. 73 bis*) les bobines primaires et secondaires sont placées l'une dans l'autre; le noyau commun étant formé de tôles planes de forme rectangulaire.

Ces tôles ont une longueur assez grande pour être repliées aux deux bouts et entourer complètement les bobines.

La bobine primaire est formée de lames de cuivre isolées, remplaçant le gros fil ordinairement employé : c'est le circuit à basse

Fig. 73 bis.



Transformateur Ferranti.

tension ; le secondaire, soigneusement isolé par une couche de papier paraffiné, est constitué par une série de bobines placées directement sur le fer.

Il y a enfin lieu de signaler les transformateurs de la Compagnie Thomson-Houston, à circuit magnétique fermé, de la Société Westinghouse, de la Compagnie Hélios, comme étant actuellement très employés industriellement.

Ces appareils se rapportent aux types précédemment étudiés et n'en diffèrent que par les méthodes prises soit pour en assurer l'isolement, la ventilation et surtout pour en diminuer les pertes par échauffement ou hystérésis.

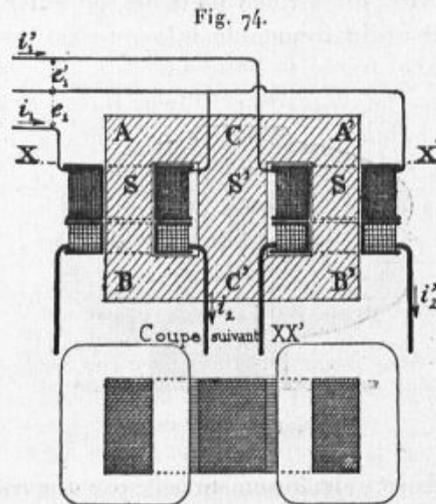
#### TRANSFORMATEURS POLYPHASÉS.

D'une manière générale, on peut dire qu'un transformateur polyphasé se compose de plusieurs transformateurs monophasés.

Comme exemple, voulons-nous construire un transformateur bi-phasé : nous ferons passer chacun des deux courants décelés dans des bobines primaires, ce qui nécessitera quatre fils de ligne d'arrivée ; à chaque bobine primaire correspondra une bobine secondaire dont les extrémités correspondront aux lignes de départ.

Par raison d'économie, les lignes d'arrivée peuvent être ramenées

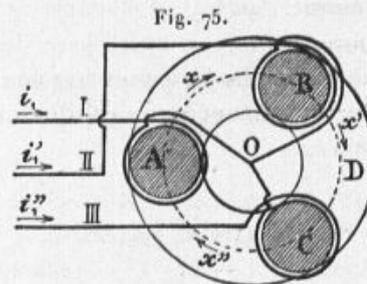
à trois, de sorte que nous aurons comme schéma général d'un transformateur biphasé celui qu'indique la figure 74.



Transformateur biphasé avec fil unique de retour.

En ce qui concerne les courants triphasés, deux cas seront également à considérer.

On peut en effet employer trois transformateurs distincts, ce qui



Coupe d'un transformateur triphasé monté en étoile.

nécessiterait six fils pour chacun des deux circuits, ou mieux monter les trois primaires en étoile, ainsi que les trois secondaires.

A cet effet, on se servira de trois noyaux verticaux ou horizontaux, constitués chacun par des plaques de tôle superposées et reliés à chaque bout par une culasse commune.

Nous donnons figure 75 une coupe, normale à la direction commune

des noyaux, d'un transformateur triphasé monté en étoile. Le plus souvent les axes des trois noyaux forment un prisme triangulaire, mais ils peuvent être quelquefois dans un même plan, vertical dans les transformateurs d'Oerlikon, de la Compagnie de Fives-Lille et de la Société Farcot frères de Saint-Ouen, horizontal dans le transformateur triphasé de la maison Brown, Boveri et C<sup>ie</sup>. Chacun des noyaux supporte la bobine primaire et la bobine secondaire soigneusement isolées du noyau et entre elles par des cylindres de papier.

Cet isolement n'est pas suffisant pour de très hautes tensions; on le remplace alors par un isolant liquide, l'huile en général, quelquefois le pétrole.

Il est à peine besoin de faire remarquer que le couplage en étoile des enroulements peut être remplacé par le couplage en triangle. On utilise le premier pour de faibles charges et le second pour les grosses charges.

En marche, le transformateur ne tarde pas à s'échauffer; on peut le refroidir par un courant d'eau, de pétrole ou même d'air.

Par définition, on appellera *puissance utile* la puissance recueillie aux bornes du secondaire et *rendement* le rapport de la puissance utile à la puissance totale fournie aux bornes du primaire. Ce rendement peut atteindre 0,98 et descend rarement au-dessous de 0,95 en pleine charge. Si l'on ne retrouve pas intégralement l'énergie, cela tient aux pertes ohmiques, au travail magnétique dû à l'hystérésis et aux courants de Foucault.

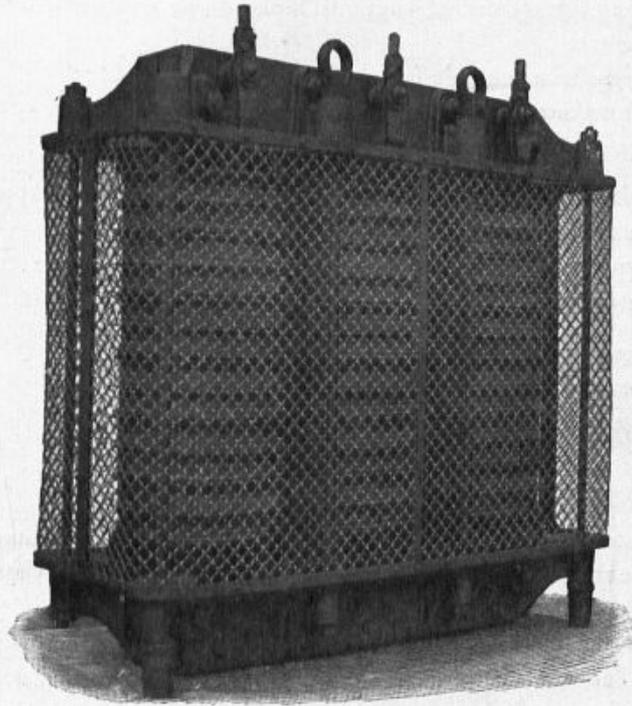
Nous donnons dans le Tableau ci-contre quelques constantes utiles pour la comparaison des principaux transformateurs modernes.

*Comparaison de quelques transformateurs de tension.*

	Courant				Puissance utile en kilowatts.	Dimensions.
	primaire.		secondaire.			
	Volts.	Ampères.	Volts.	Ampères.		
Transformateur Patin.	2400	1,7	100	40	4	»
Transformateur Helmer.	2400	10	120	200	24	»
Transformateur triphasé de la <i>Cie Fives-Lilie.</i>	41,5	»	4150	»	180	»
Transformateur diphasé de la <i>General Elec- tric Co</i> (1899).	2000	»	11000	»	1800	longueur : 2 <sup>m</sup> ,6 hauteur : 3 <sup>m</sup> ,3 épaisseur : 1 <sup>m</sup> ,3
Transformateur diphasé du Niagara (1903).	2200	908	50	40000	2000	hauteur : 2 <sup>m</sup> ,90 surface : 2 <sup>m</sup> <sup>2</sup> ,4
Transformateur d'Oerlikon.	»	»	5000	»	»	»
Transformateur de la Société <i>l'Éclairage électrique</i> système Labour.	3000	»	25000	»	4 30 (triphasé)	» »
Transformateur de Lauffen- Francfort (1891)	50	»	8000	200	160	»
Transformateur triphasé Farcot.	120	»	9500	»	100	»

Nous représentons ci-dessous en perspective ce dernier transformateur (*fig. 75 bis*).

Fig. 75 bis.



Transformateur triphasé Farcot.

*Note* : Dans ce transformateur triphasé le primaire et le secondaire sont montés en étoile. Le primaire intérieur est constitué par de grosses barres circulaires de cuivre; on voit extérieurement les bobines secondaires à haute tension; chaque bobine est sectionnée et l'isolement se fait à la micanite.

#### TRANSFORMATEURS POLYMORPHIQUES.

Tous les appareils précédemment étudiés peuvent être considérés comme modificateurs des qualités de l'énergie électrique sans altération de forme, d'où le nom de transformations *homomorphiques* qui leur est souvent donné, par opposition à la dénomination de transformateurs *polymorphiques* réservée à ceux dans lesquels la nature des courants est altérée.

On peut diviser ces derniers comme il suit :

- 1° Transformateurs d'un courant alternatif simple en courant bi ou triphasé;
- 2° Transformateurs de courants biphasés ou triphasés, ou réciproquement;
- 3° Transformateurs de fréquence;
- 4° Transformateurs de courants mono ou polyphasés en courants continus (convertisseurs, panchahuteurs et commutateurs).

Ces différentes transformations s'obtiennent au moyen d'appareils que nous allons tout d'abord étudier.

Ces appareils communs peuvent eux-mêmes se subdiviser en plusieurs groupes :

- 1° Les commutateurs et convertisseurs;
- 2° Les moteurs-générateurs ou moteurs-dynamos;
- 3° Les redresseurs.

#### 1° *Commutateurs et convertisseurs.*

Ce sont des machines dynamos bi ou multipolaires présentant sur le même anneau mobile, soit un double enroulement (convertisseurs), soit un enroulement unique (commutateurs).

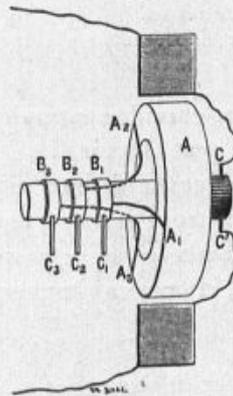
L'une des faces de cet anneau est connectée en mono, bi ou triphasé; l'autre en continu, mono ou biphasé; nous aurons donc les combinaisons suivantes caractérisées par un double système de liaisons.

Transformation.	Face droite de l'anneau à deux enroulements ou à enroulement unique.	Face gauche du même anneau.
Alternatif simple en continu.	L'induit est connecté à deux bagues isolées.	Enroulement muni d'un collecteur.
Biphasés en continu.	L'induit est relié à quatre bagues isolées.	Collecteur d'un courant continu.
Triphasés en continu.	On peut se servir de six bagues isolées, mais trois sont suffisantes.	Collecteur ordinaire.
Triphasés en biphasés.	Trois bagues isolées à 120° ou six bagues à 60°.	Quatre bagues isolées.

Transformation.	Face droite de l'anneau à deux enroulements ou à enroulement unique.	Face gauche du même anneau.
Biphasés en alternatif simple.	Quatre bagues isolées pour l'arrivée.	Deux bagues reliées à deux points diamétralement opposés.
Triphasés en alternatif simple.	Trois bagues à 120° ou six bagues à 60°.	Deux bagues.
Alternatif simple en alternatif simple décalé mais de même période.	Deux bagues.	Deux bagues décalées sur les premières.

Nous donnons (*fig. 76*) la perspective d'une transformation de

Fig. 76.



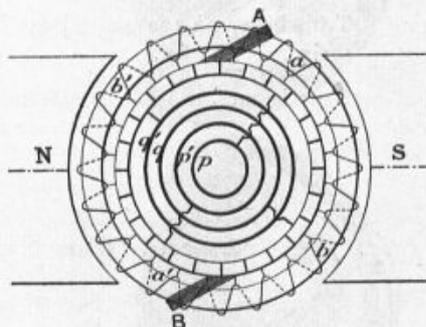
triphases en continus, et (*fig. 76 bis*) le schéma d'une transformation de biphasés en continu.

On peut dire d'une façon générale que, dans le cas d'un enroulement unique, cet enroulement présente deux sortes de liaisons : les unes correspondant au système que l'on veut transformer, les autres au système que l'on veut obtenir.

La première idée de cette transformation est due à S.-P. Thompson (*Royal Institution*, 23 février 1894), qui obtint la transformation des courants triphasés en biphasés, en munissant l'induit d'un anneau, sur l'une de ses faces, de liaisons triphasées, et, sur l'autre, de liaisons biphasées.

Le mécanisme de la transformation est très simple; tout d'abord, l'appareil excité par les courants à transformer, fonctionne comme un moteur synchrone, puis ensuite, grâce au deuxième enroulement

Fig. 76 bis.



Transformation des courants biphasés en continus.

ou aux connexions de son enroulement unique, comme un générateur des courants que l'on veut obtenir.

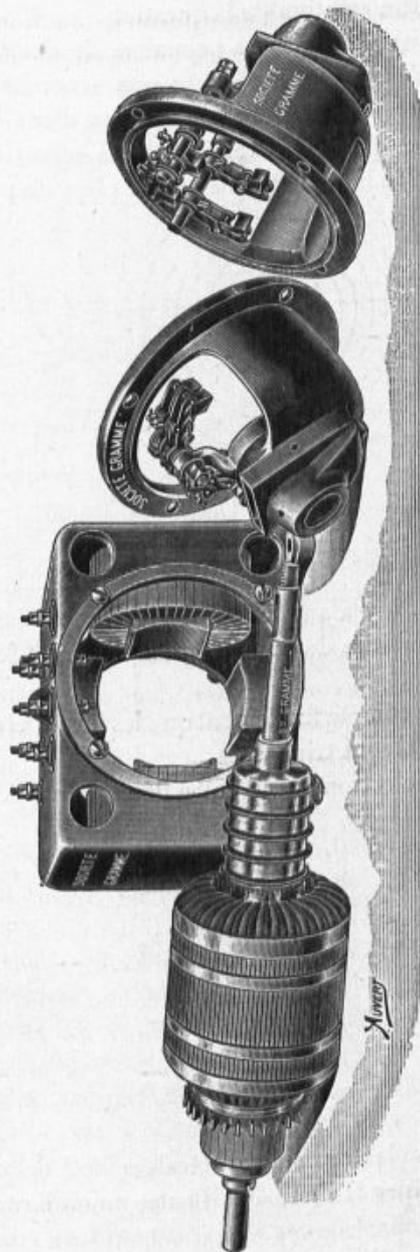
La théorie complète des convertisseurs est, en réalité, beaucoup moins simple; nous ne pouvons insister, dans une théorie élémentaire, sur les divers phénomènes qui se passent dans le fonctionnement d'une telle machine, et nous en résumerons rapidement les propriétés :

*Dans une commutatrice la puissance est d'autant plus grande que le nombre des phases est plus élevé; on prend trois phases pour 300 kilowatts, six phases pour des puissances supérieures. Le nombre des pôles d'une commutatrice est le même que celui du moteur synchrone tournant avec la même vitesse; les différences de potentiel aux deux faces sont dans un rapport déterminé, la commutation se fait sans étincelle avec un rendement de 90 pour 100 environ. Enfin le nombre des touches du collecteur est variable avec la fréquence.*

Nous donnons ci-contre la perspective de la commutatrice Gramme.

Nous signalerons enfin, comme se rattachant aux commutateurs, le dispositif dû à Scott et les permutateurs à balais tournants.

Fig. 76 ter.



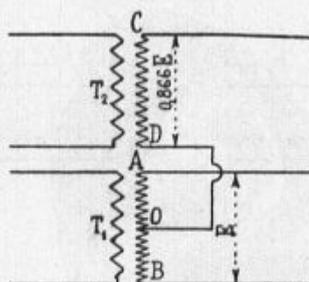
Commutatrice Gramme (type biphasé-continu).

Note : Sur la gauche de la figure on voit l'induit mobile muni d'un collecteur sur l'une de ses faces et de quatre bagues isolées sur l'autre; à droite se trouvent les calottes formant paliers et munies l'une de deux, l'autre de quatre balais.

*Transformateur Scott pour bi- et triphasés.* — Scott, le 1<sup>er</sup> mars 1894, donnait une autre solution de la question.

Son procédé consiste à relier les primaires de deux transformateurs à une génératrice biphasée; quant aux secondaires, ils sont connectés de telle sorte que l'extrémité O de l'un d'eux coïncide avec le milieu de l'autre et que les extrémités libres soient équidistantes l'une de l'autre, ce qu'indique la figure 77. De plus, de part et d'autre

Fig. 77.

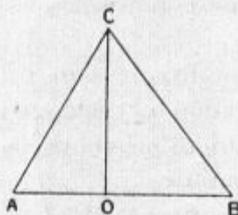


du point commun O, il y a sur le premier OC secondaire 87 spires, et, sur chacune des moitiés du second, un nombre  $\sqrt{3}$  fois plus petit, c'est-à-dire 50.

On peut se rendre compte finalement que les forces électromotrices entre les points A, B, C sont triphasées.

En effet, la force électromotrice entre deux points A et C se com-

Fig. 77 bis.

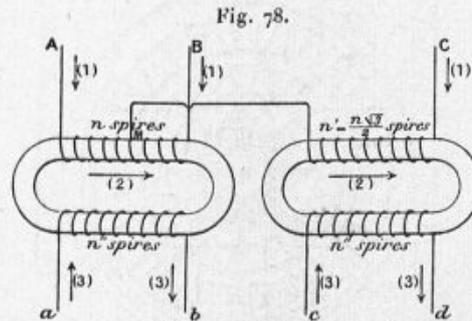


pose de deux forces électromotrices décalées de  $\frac{1}{4}$  de période, l'une pouvant être figurée, par la ligne OA, l'autre par la ligne OB perpendiculaire.

De même, la force électromotrice entre B et C sera la résultante

des deux forces électromotrices OB et OC. Enfin, la force électromotrice entre B et A sera BA et, par suite, les trois forces électromotrices seront représentées par les côtés d'un triangle équilatéral, ce qui exige que le nombre des spires de OC soit  $\sqrt{3}$  fois plus grand que celui de OB (*fig. 77 bis*).

Pratiquement, on emploie la disposition indiquée par la figure 78.



Un exemple de cette transformation se trouve réalisé dans les génératrices du Niagara où l'on transforme un courant diphasé de 2200 volts en un courant triphasé de 22 000 volts.

*Permutateurs à balais tournants.* — La loi de Lenz nous fait prévoir que :

Lorsqu'un champ tournant produit par des courants polyphasés agit sur un induit Gramme, muni de son collecteur, il y produit une force électromotrice identique à celle qui existerait si, le champ étant supposé fixe, l'anneau tournait en sens contraire avec une vitesse égale.

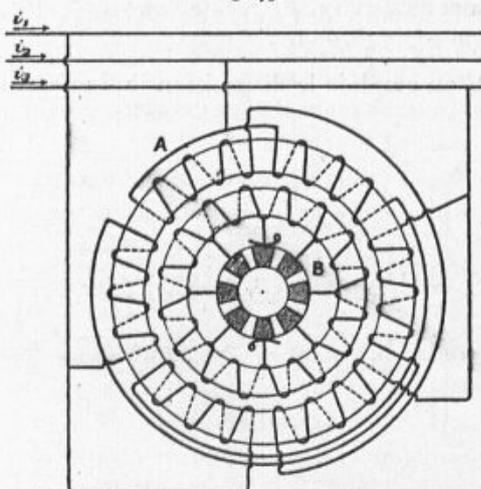
En conséquence, si l'on dispose deux balais aux extrémités d'un diamètre normal à la direction du champ, il est évident que, se trouvant placés dans les conditions mêmes de la machine Gramme, on y recueillera un courant continu.

Mais le champ se déplaçant, il faudra faire en sorte que les balais soient constamment sur la ligne neutre normale à la direction du champ; il faudra donc que ces balais se déplacent sur le collecteur synchroniquement avec le champ.

On y arrivera en les reliant à deux bagues fixées à l'axe d'un balancier dont le mouvement sera obtenu à l'aide d'un moteur synchrone.

Cette ingénieuse disposition est due à M. Rodet (1893), et nous donnons ci-contre le schéma qu'il en a fourni (*fig. 79*).

Fig. 79.



Transformateur Rodet.

On voit facilement que les convertisseurs peuvent servir aux usages suivants :

- 1° Génératrices de courants mono, polyphasés ou continus;
- 2° Convertisseurs réciproques entre les divers courants;
- 3° Moteurs continus synchrones, mono ou polyphasés.

2° *Moteurs générateurs ou moteurs dynamos.*

Tout appareil de ce genre comprend un moteur et un générateur reliés mécaniquement, de telle sorte que le rotor du moteur actionne l'inducteur du générateur.

Par exemple, un moteur à courants triphasés pourra actionner un générateur continu, alternatif ou biphasé, et réciproquement..

Le nombre des combinaisons est donc très grand et, suivant la nature, le nombre de pôles des machines accouplées, le résultat obtenu sera très variable.

Par exemple, si nous manchonnons un moteur synchrone à huit pôles avec une génératrice à vingt-quatre pôles, il est évident que la

fréquence des courants produits sera triple de celle des courants actionnant le moteur; et, dans ce cas, le moteur dynamo sera un transformateur de fréquence.

Mais le moteur peut être quelconque ainsi que le générateur, de telle sorte que le rôle des moteurs dynamos est multiple et analogue à celui des convertisseurs.

Ajoutons que le rendement de ces derniers est supérieur aux rendements qu'ils peuvent fournir.

Le système moteur-générateur accouplés permet donc une transformation très intéressante de la puissance électrique.

### 3°. *Appareils redresseurs.*

Le rôle des redresseurs est de permettre, soit la transformation directe des courants polyphasés à haute tension en courants continus, soit l'utilisation des courants alternatifs pour l'éclairage ou la charge des accumulateurs; nous étudierons rapidement comme principaux types de redresseurs le redresseur Pollak, le redresseur électrolytique de Graetz, enfin le convertisseur ou le panchahuteur de MM. Hutin et Leblanc.

*Redresseur Pollak.* — L'organe essentiel en est formé par une étoile à huit branches groupées en deux séries isolées, communiquant avec le générateur alternatif.

On communique à ce système un mouvement de rotation au moyen d'un moteur synchrone de même fréquence que celui à redresser; enfin, des balais peuvent frotter pendant un certain temps sur deux touches successives; on fait en sorte que ce frottement n'ait lieu que lorsque la force électromotrice entre ces deux touches est voisine de son maximum, de telle sorte que le circuit extérieur aboutissant aux balais sera soumis à des forces électromotrices constantes, en des intervalles de temps très rapprochés et égaux au  $\frac{1}{8}$  du temps mis pour une rotation complète de l'étoile.

En définitive, le courant alternatif est transformé en courant continu par le redresseur Pollak, grâce à ce fait que l'on n'utilise la force électromotrice alternative que pendant un intervalle de temps où elle peut être considérée comme constante en grandeur et en direction.

*Redresseur de Graetz.* — Le principe en est très simple et peut s'exposer comme il suit :

*Si l'on cherche à réaliser l'électrolyse d'une dissolution d'alun ordinaire avec une anode en aluminium et une cathode en charbon par un courant alternatif, il n'y aura décomposition de l'électrolyte que pour une valeur déterminée en grandeur et en direction de la force électromotrice alternative.*

Cette valeur de la force électromotrice est de 22 volts pour l'élément Graetz, mais peut s'élever à quelques centaines de volts en faisant varier la nature de la cathode et l'électrolyte.

On conçoit donc que, si deux de ces éléments sont reliés en série aux bornes d'un alternateur, il puisse y avoir dans le fil de communication un courant ayant toujours la même direction.

*Panchahuteur Hutin et Leblanc.* — Cet appareil, utilisé pour triphasés, comprend :

- 1° Un transformateur portant trois bobines primaires et un plus grand nombre de bobines secondaires que l'on peut grouper deux à deux, trois à trois, etc., de manière à réaliser douze circuits secondaires parcourus par des courants alternatifs décalés de  $\frac{1}{12}$  de période;
- 2° Un anneau Gramme bipolaire formé par 12 bobines et comprenant 12 lames au collecteur.

Le mécanisme de la transformation est le suivant : on relie l'un des douze circuits à la première et à la deuxième lame, le circuit suivant à la deuxième et à la troisième, ainsi de suite ; puis on communique au collecteur, et par suite à l'anneau, un mouvement de rotation uniforme à l'aide d'un petit moteur actionné par une dérivation du courant polyphasé, de telle façon qu'un tour entier corresponde à la période du courant.

On obtiendra alors, entre deux balais diamétralement opposés et reposant sur le collecteur, un courant continu.

Ajoutons que le groupement convenable des bobines devant constituer les douze circuits se fait d'une façon automatique par le jeu du commutateur.



## CHAPITRE VI.

### TRANSPORT DE L'ÉNERGIE. ÉCLAIRAGE ET TRACTION POLYPHASÉS.

Pour une même énergie on peut opérer soit avec de faibles, soit avec de puissants voltages.

Soit, par exemple, à transporter 100 000 watts à  $10^3$  km entre deux stations A et B.

On pourra utiliser à la station A de départ :

$$\begin{aligned} \text{force électromotrice} &= 100 \text{ volts,} \\ \text{intensité} &= 1000 \text{ ampères.} \end{aligned}$$

Or, cherchons quelle partie de cette énergie sera perdue par l'effet Joule; on admet généralement qu'elle est de 10 pour 100, soit 10 000 watts, ce qui fixe la résistance. On a, en effet,

$$RI^2 = 10000,$$

et, comme  $I^2 = (10^3)^2 = 10^6$  ampères,

$$R = \frac{10000}{10^6} = \frac{1}{100} \text{ ohm} = 0^{\text{m}}, 01.$$

La section du conducteur utilisé se calculera par la formule

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

dans laquelle :

$\rho$  est la résistivité ou résistance spécifique,

$l$  la longueur du fil,

$s$  la section de ce fil.

Nous n'entrerons pas dans les méthodes donnant la résistivité.

Admettons que le fil transmetteur soit en cuivre, métal pour lequel

M.

7

$\rho = 1600$ ; nous obtiendrons dans ces conditions, pour déterminer la section, l'égalité

$$\frac{1600 \times 1\,000\,000}{s} = \frac{1}{100} \times 10^9,$$

c'est-à-dire

$$s = 160\text{cm}^2.$$

Faisons le même transport en transformant l'énergie en A par un appareil spécial élevant le voltage par exemple.

Ce qui revient à supposer qu'à la station de départ nous disposions de la même énergie, mais dans des conditions différentes du premier transport; soit, par exemple, avec une force électromotrice de 10 000 volts et une intensité de 10 ampères.

Dans ces nouvelles conditions, et en admettant la même perte d'énergie ohmique, nous aurons, pour déterminer la nouvelle section, à résoudre l'égalité

$$\frac{1600 \times 1\,000\,000}{s} = 10\,000 \times 10^7;$$

d'où l'on tire

$$s = \frac{16}{10^3} = \frac{1}{1000} \text{ de } 16\text{cm}^2.$$

Le rapport des sections dans les deux transports sera

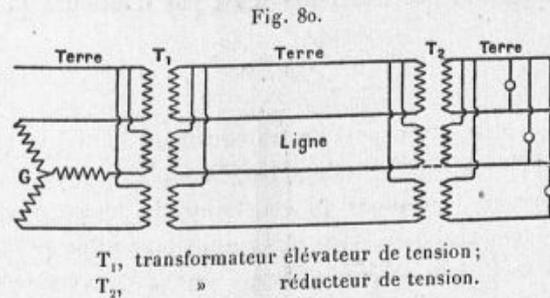
$$\frac{160}{16 \times 10^{-3}} = 10\,000.$$

Ce nombre énorme nous montre l'économie réalisée en élevant le voltage à la station de départ.

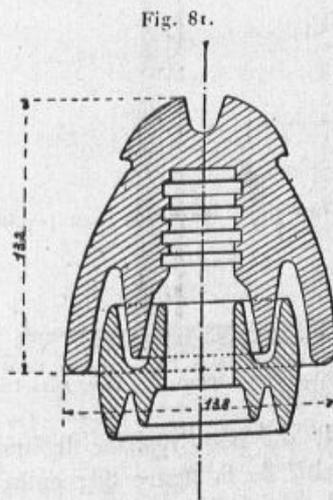
A cette station il nous faut donc un transformateur pour élever le voltage et comme, d'autre part, à l'arrivée un pareil voltage ne pourrait être utilisé pour les besoins industriels, il nous faudra à la station d'arrivée également un autre transformateur susceptible de transformer l'énergie en abaissant le voltage.

Nous pouvons donc figurer par le schéma suivant les conditions dans lesquelles doit se faire un transport de force dans de bonnes conditions économiques; afin d'éviter les accidents résultant de l'emploi de la haute tension au départ, il est utile de mettre en communication avec la terre les centres des étoiles des transformateurs au départ et à l'arrivée (*fig. 80*).

Dans l'établissement des fils conducteurs entre les deux stations, il faut en réaliser l'isolement rigoureux; on emploie à cet effet des iso-



lateurs à double cloche et à huile légère. Un des plus employés est l'isolateur Mengarini-Ganz indiqué par la figure 81.



Isolateur Ganz.

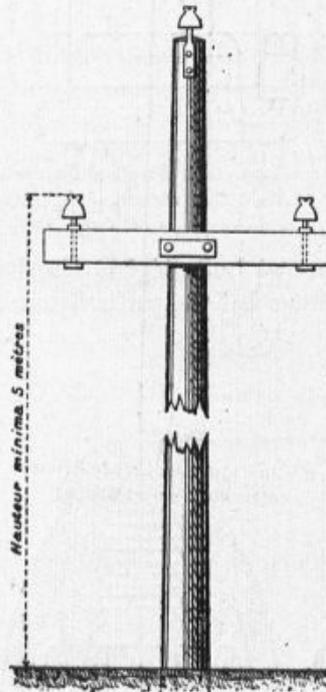
*Note* : Les dimensions de cet isolateur en porcelaine sont indiquées en millimètres; la partie inférieure porte une rigole qu'on remplit d'huile.

Trois de ces isolateurs seront placés sur un même poteau, à égale distance l'un de l'autre, le plus ordinairement suivant les sommets d'un triangle équilatéral, de telle sorte que les fils conducteurs, soutenus par un certain nombre de poteaux semblables établis le long

de la voie, forment par leur ensemble un prisme triangulaire équilatéral (*fig. 82*).

Cette disposition des isolateurs n'est pas d'ailleurs la seule pos-

Fig. 82.



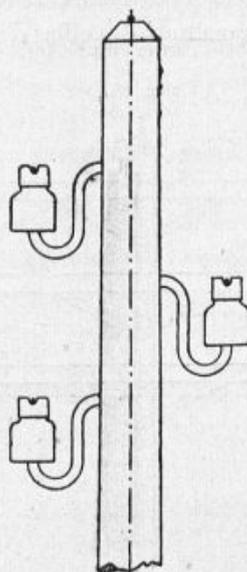
Disposition équilatérale des isolateurs triphasés.

sible : tout d'abord, on peut réaliser le triangle équilatéral en employant le dispositif de la figure 83; enfin, les trois isolateurs peuvent être disposés sur une même verticale ou une même horizontale, ce qu'indique la figure 84.

Ces dispositions diverses conviennent, soit aux courants triphasés, soit aux biphasés avec fil commun de retour; si, dans ce dernier cas, on veut employer quatre fils on pourra donner aux isolateurs la disposition de la figure 85.

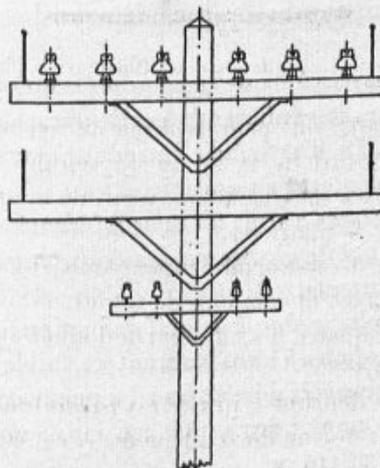
Il y a lieu de se demander quelle est parmi toutes ces méthodes la meilleure au point de vue du rendement. A cet effet, remarquons que chaque fil de ligne produit un champ magnétique réagissant par in-

Fig. 83.



Disposition schématique de la canalisation triphasée entre Paderno et Milan.

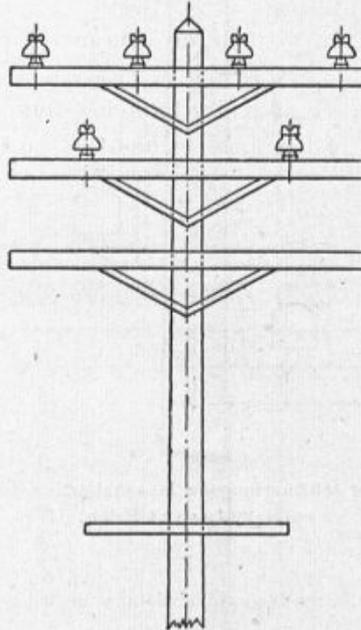
Fig. 84.



duction sur les autres fils : il faudra donc se placer dans des conditions telles que les effets d'induction mutuelle soient minimum.

On doit à M. Blondel une étude des effets d'induction sur les lignes

Fig. 85.



polyphasées. Nous extrayons de son Mémoire les conclusions suivantes :

« Les lignes triphasées à haute tension présentent une inductance négligeable, plusieurs fois inférieure à celle d'une ligne monophasée de même puissance. La dissymétrie introduite par l'emploi de trois fils dans un même plan est peu sensible.

» Les lignes diphasées à trois fils sont inférieures aux précédentes et présentent, à égalité de charge sur les deux circuits, une dissymétrie de voltage importante.

» La chute de voltage due à la self-induction étant fonction du courant, les canalisations à gros courant et faible tension ont des chutes de tension considérables et leur longueur doit être réduite le plus possible pour l'emploi des hautes tensions jusque dans le voisinage du lieu d'utilisation. »

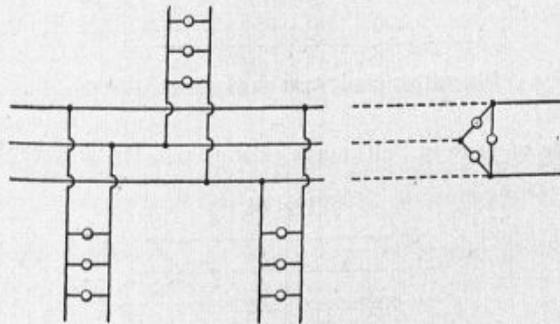
## APPLICATION DES COURANTS POLYPHASÉS A L'ÉCLAIRAGE.

On peut utiliser, soit des lampes à arc, soit des lampes à incandescence; dans leur disposition on fait en sorte que l'énergie de chaque phase soit également utilisée.

Par exemple, dans un système de courants triphasés, on pourra adopter deux procédés.

Les lampes pourront en effet être branchées entre les conducteurs pris deux à deux; on réalise ainsi le montage en triangle (*fig. 86*).

Fig. 86.



Disposition en triangle des lampes en triphasé.

On pourra également les distribuer entre le fil unique de retour, non supprimé dans ce cas, et chacun des fils de ligne; c'est le montage en étoile (*fig. 87*).

A proprement parler il n'y a pas de lampes spéciales pour courants polyphasés et les régulateurs y sont fondés sur les mêmes principes qu'en courant continu.

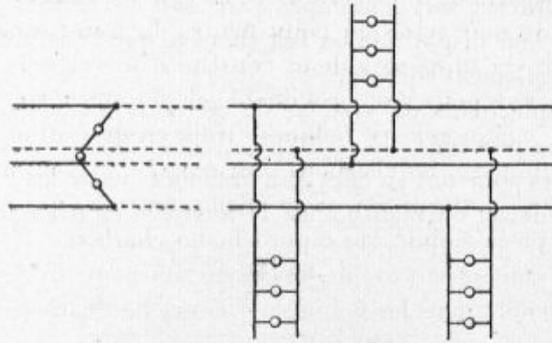
Or, dans ce dernier cas, on sait qu'il est nécessaire de pouvoir disposer d'une résistance auxiliaire lorsque la lampe ne nécessite qu'une partie du voltage disponible; pour l'éclairage en polyphasé, nous remplacerons cette résistance par une bobine de self-induction.

Depuis quelque temps, il y a toutefois une tendance à créer des modèles de lampes spécialement destinés aux circuits polyphasés.

Nous en trouvons quelques types, dus à M. Richard Flemming de Swampscott; dans la revue *L'Électricien*, du 10 octobre 1903; en voici les principales dispositions :

Dans un premier système, schématiquement indiqué par la

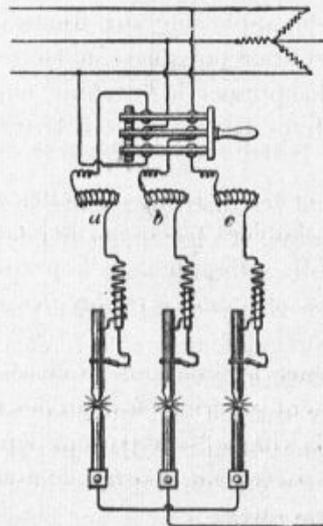
Fig. 87.



Disposition des lampes en étoile en triphasé.

figure 88, le réglage et l'allumage se font par les solénoïdes *a*, *b*, *c*,

Fig. 88.

Disposition nouvelle (1903) de lampes à arc  
sur une canalisation triphasée.

pouvant actionner les charbons supérieurs qui sont seuls mobiles ;  
chacun de ceux-ci se trouve relié à l'un des fils de ligne par l'inter-

médiaire d'un commutateur et le conducteur de communication comprend, outre les solénoïdes, une bobine de self-induction.

Quant aux charbons inférieurs fixes, en contact avec les premiers à l'allumage, ils sont reliés au point neutre du transformateur. Un autre dispositif, dû au même auteur, consiste à intercaler dans le circuit des lampes un petit moteur à double champ tournant.

Ce moteur comprend six bobines, trois en dérivation, trois en série; si, à l'allumage, les charbons sont séparés, le courant traverse les trois bobines en dérivation et le champ tournant qui en résulte actionne une pièce mobile qui rapproche les charbons.

Dès que le contact se produit, le champ tournant inverse se substituera au premier dans les bobines sériées et les charbons tendront à s'écarter.

En définitive, le réglage s'établira par équilibre entre les deux champs tournants inverses.

#### APPLICATION DES COURANTS POLYPHASÉS A LA TRACTION.

Une première méthode, applicable aux tramways et locomotives, consiste à convertir le courant polyphasé de haut voltage en un courant continu capable d'actionner la machine mobile, et la traction polyphasée se trouve de ce fait ramenée à la traction par courants continus (1).

Un second procédé consistera à transmettre les courants polyphasés eux-mêmes aux moteurs placés sur la locomotive, à une tension moyenne de 600 volts suffisante dans la pratique; à cet effet, on se servira de deux lignes aériennes à trolley, les rails constituant le troisième fil.

On utilise de préférence les courants triphasés dont le couple au démarrage est relativement supérieur à celui des biphasés.

Quant au réglage de la vitesse, si important dans le cas d'une forte inclinaison de la rampe parcourue, il se fait de nombreuses manières. Nous signalerons les suivantes :

---

(1) Dans l'installation du chemin de fer métropolitain de Paris les courants triphasés à 5000 volts sont d'abord transformés en courants triphasés à 430 volts et ces derniers, au moyen d'une commutatrice convenable, en courant continu à 6000 volts: la même transformation se fait directement dans certaines sous-stations, au moyen d'un moteur dynamo triphasé continu.

Une première méthode consiste à augmenter au moyen d'un commutateur le nombre des pôles inducteurs; dans un second procédé on introduit simplement dans le circuit de l'organe mobile une résistance dénuée de self-induction.

On peut encore lancer, dans le circuit de cet organe, un courant continu provenant d'une batterie d'accumulateurs ou produit par une dynamo actionnée par le moteur même.

Mais de tous ces procédés celui qui donne les meilleurs résultats pratiques est dû à Steinmetz et connu sous le nom de *réglage en tandem-multiple*.

Dans ce procédé on installe, sur la voiture mobile, une ou plusieurs paires de moteurs polyphasés. Ces moteurs sont montés en cascade, c'est-à-dire que le rotor bobiné et à bagues de l'un quelconque d'entre eux est relié aux bornes de l'inducteur du moteur suivant; l'inducteur du premier moteur est en communication avec les fils de ligne et le rotor à bagues du dernier avec un rhéostat de démarrage; lorsque ce rhéostat est en court-circuit la vitesse commune à chaque moteur est égale à la vitesse synchronique divisée par le nombre de paires des moteurs employés.

De nombreux progrès ont été réalisés depuis l'installation du premier tramway à courant triphasé, installé à Lugano en 1895, par MM. Brown, Boveri et C<sup>ie</sup>.

Ce tramway avait, en effet, une vitesse normale de 15<sup>km</sup> à l'heure, alors que, dans les dernières expériences faites en triphasé, on a obtenu couramment une vitesse de 160<sup>km</sup>.

Il nous resterait encore à traiter tout ce qui concerne l'installation des usines centrales pour polyphasés et de tous les détails mécaniques concernant la distribution de l'énergie électrique: feeders, survolteurs, câbles spéciaux, interrupteurs et fusibles de sûreté, toutes choses qui nous paraissent être du domaine spécial de l'ingénieur.

Nous renverrons le lecteur aux Traités spéciaux, n'ayant eu pour but que d'exposer, d'une manière aussi élémentaire qu'il nous a été possible, la production et l'utilisation des courants polyphasés.



## CHAPITRE VII.

### CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES SUR LES COURANTS ALTERNATIFS ET POLYPHASÉS.

Nous croyons devoir diviser cette étude en plusieurs paragraphes qui seront :

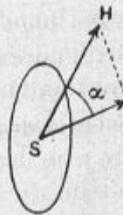
- 1° Généralités sur les courants alternatifs et polyphasés;
- 2° Canalisations et puissance polyphasées;
- 3° Étude des alternateurs polyphasés;
- 4° Étude des moteurs asynchrones;
- 5° Étude des transformateurs homomorphiques et polymorphiques

Nous réduirons d'ailleurs chacun d'eux au minimum nécessaire à l'étude complète des faits expérimentaux que nous venons de décrire dans les Chapitres précédents.

#### I. — Généralités sur les courants alternatifs et polyphasés.

Rappelons d'abord quelques définitions nécessaires sur les diverses grandeurs que nous aurons à considérer par la suite :

Fig. 89.



- 1° Le flux de force  $\Phi$  correspondant à une surface  $S$  (*fig.* 89) placée dans un champ d'intensité uniforme  $H$  est par définition le produit

de cette surface par la composante du champ suivant la normale à la surface; en sorte que si la direction du champ fait un angle  $\alpha$  avec la normale à la surface, on aura comme expression du flux

$$\Phi = SH \cos \alpha.$$

L'unité de flux a reçu le nom de *Maxwell*; on voit facilement qu'elle représente le flux produit par un champ égal à l'unité ou *Gauss* sur une surface normale égale à  $1 \text{ cm}^2$ .

2° La force électromotrice d'induction ou énergie produite dans l'électromoteur par le passage de l'unité d'électricité, est en valeur absolue égale à la dérivée du flux par rapport au temps; nous la désignerons par la lettre  $e$ , ce qui donne pour son expression

$$e = \frac{d\Phi}{dt};$$

sa valeur numérique sera un certain nombre de volts.

3° Le coefficient de self-induction d'un circuit parcouru par un courant est le rapport de la variation du flux limité par le circuit à la variation de l'intensité du courant; on le désigne par la lettre  $L$ , ce qui fournit l'égalité

$$L = \frac{d\Phi}{di}.$$

Ses dimensions sont celles d'une longueur; aussi s'exprime-t-il en centimètres dans les différents calculs que pourrait donner l'application du système C.G.S.

L'unité pratique est appelée le *Henry*; sa valeur numérique est de  $10^9 \text{ cm}$ .

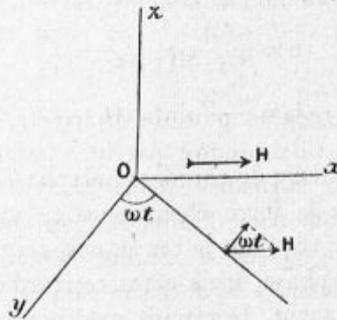
*Considérations théoriques sur l'expérience fondamentale (voir p. 2).* — Ces définitions étant données, considérons trois axes de coordonnées rectangulaires dont l'un  $Ox$  sera la direction du champ électromagnétique  $H$ , et un deuxième,  $Oz$ , l'axe de rotation d'une bobine plate dont la trace sur le plan des  $xy$  sera  $OD$  (*fig. 90*).

Prenons comme position initiale du cadre tournant le plan  $zOy$  normal au champ, et supposons que le cadre tourne d'un mouvement uniforme autour de son axe  $Oz$ .

Si l'on désigne par  $\omega$  sa vitesse angulaire, définie par la relation

$\omega T = 2\pi$  dans laquelle  $T$  est la durée de rotation, il est évident

Fig. 90.



que l'angle  $yOD$  est égal à  $\omega t$ ; par suite, la composante du champ suivant la normale au cadre sera  $H \cos \omega t$ ; on en déduit

$$\Phi = SH \cos \omega t,$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = e = -\omega SH \sin \omega t,$$

et, par suite, si nous supposons le fil du cadre dénué de self-induction, nous aurons, pour l'intensité  $I$  du courant produit,

$$-RI = -\omega SH \sin \omega t,$$

c'est-à-dire

$$I = \frac{\omega SH}{R} \sin \omega t.$$

En désignant par les symboles  $E_{\max}$ ,  $I_{\max}$  les valeurs

$$E_{\max} = \omega SH,$$

$$I_{\max} = \frac{\omega SH}{R},$$

on aura finalement

$$(z) \quad \begin{cases} E = E_{\max} \sin \omega t, \\ I = I_{\max} \sin \omega t. \end{cases}$$

Si maintenant on imagine plusieurs cadres identiques faisant entre eux des angles fixes  $\omega_1, \omega_2, \dots$ , les flux de force à un instant donné seront

$$\Phi = SH \cos \omega t,$$

$$\Phi_1 = SH \cos(\omega t + \omega_1),$$

$$\Phi_2 = SH \cos(\omega t + \omega_2),$$

et les courants qui les parcourront auront pour expression

$$I = \frac{\omega SH}{R} \sin \omega t,$$

$$I_1 = \frac{\omega SH}{R} \sin(\omega t + \omega_1),$$

$$I_2 = \frac{\omega SH}{R} \sin(\omega t + \omega_2);$$

c'est un véritable système de courants polyphasés.

On en représente la force électromotrice et l'intensité comme nous l'avons vu page 18; dans le cas actuel, ces deux grandeurs sont en concordance de phase, mais cette concordance n'est que théorique, car, pratiquement, le circuit extérieur présente, soit de la self-induction, soit de la capacité, soit parfois l'une et l'autre. Nous allons en examiner l'influence.

*Force électromotrice alternative animant un circuit de résistance R et de self-induction L.*

La position initiale du cadre étant celle indiquée précédemment, on obtient, pour une rotation  $\theta = \omega t$ , la relation

$$(1) \quad E_{\max} \sin \omega t - RI = L \frac{dI}{dt}.$$

Cette équation intégrée donne

$$I = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}} \sin(\omega t - \varphi) + A e^{-\frac{R}{L} t},$$

avec la condition  $A = \text{const.}$ ,

$$\tan \varphi = \frac{\omega L}{R};$$

d'où

$$\varphi = \text{arc tang } \frac{\omega L}{R}.$$

Or, en régime permanent, le terme exponentiel est nul, de telle sorte que le courant obtenu est alors caractérisé par les égalités

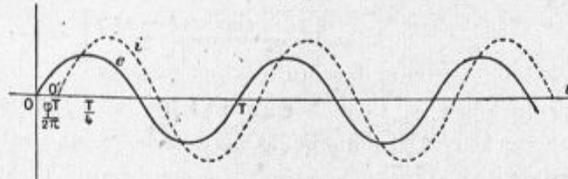
$$E = E_{\max} \sin \omega t,$$

$$I = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin(\omega t - \varphi).$$

Il n'y a plus concordance de phase entre la force électromotrice

et l'intensité qui se trouve décalée en arrière; de plus la résistance apparente  $\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$  appelée *impédance* étant plus élevée, l'intensité du courant se trouve diminuée d'autant. On peut représenter graphiquement ces deux courbes par deux sinusôides dont l'une

Fig. 91.



coïnciderait avec l'autre par un déplacement latéral  $\frac{\varphi T}{2\pi}$ , ce qu'indique la figure 91. On peut écrire l'intensité sous la forme suivante :

$$I = \frac{E_m \cos \varphi}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}} \sin \omega t - \frac{E_m \sin \varphi}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}} \cos \omega t.$$

Posons

$$I_1 = \frac{E_m \cos \varphi}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}} \sin \omega t,$$

$$I_2 = - \frac{E_m \sin \varphi}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}} \cos \omega t,$$

on aura

$$I = I_1 + I_2.$$

Par définition, le courant  $I_1$ , qui est en concordance de phase avec la force électromotrice est appelé *courant watté*, alors que le courant  $I_2$ , dont la différence de phase est de  $90^\circ$ , a reçu le nom de *courant dévatté*. On voit facilement que si le coefficient  $L = 0$ , on aura  $\tan \varphi = 0$  et, par suite,  $\sin \varphi = 0$ ; dans ces conditions on obtient

$$I = I_1,$$

c'est-à-dire que le courant watté subsiste seul; le contraire aurait lieu pour  $R = 0$ .

Ces expressions nous donnent les valeurs numériques des grandeurs que nous avons appelées *force électromotrice* et *intensité efficace* (voir p. 20).

Nous avons, en effet, la relation

$$I_{\text{eff}}^2 T = \int_0^T I^2 dt,$$

or

$$\begin{aligned} \int_0^T \sin^2(\omega t - \varphi) dt &= \int_0^T \frac{1 - \cos(2\omega t - 2\varphi)}{2} dt \\ &= \left[ \frac{t}{2} - \frac{\sin(2\omega t - 2\varphi)}{4\omega} \right]_0^T = \frac{T}{2}. \end{aligned}$$

Par suite

$$I_{\text{eff}}^2 T = \left( \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}} \right)^2 \frac{T}{2};$$

d'où l'on tire

$$I_{\text{eff}} = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707 I_{\text{max}}.$$

On aurait de même

$$E_{\text{eff}} = 0,707 E_{\text{max}},$$

et, par suite,

$$\frac{E_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} = \frac{E_{\text{max}}}{I_{\text{max}}} = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}.$$

Sous cette forme, on voit que la force électromotrice efficace est le quotient de l'intensité efficace par l'impédance.

Ajoutons que cette impédance peut être considérée comme la résultante rectangulaire des deux termes  $R$  et  $\omega L$ ; ce dernier est appelé *inductance*. Enfin le quotient  $\frac{L}{R}$  a été désigné sous le nom de *constante de temps*; on voit que, si cette constante est considérable, le décalage sera voisin de  $\frac{\pi}{2}$ .

Expérimentalement, on peut montrer l'influence de la self-induction en intercalant subitement une bobine de self-induction dans le circuit d'un courant alternatif alimentant une lampe à incandescence; on voit alors l'intensité lumineuse décroître et arriver à être sensiblement nulle; ce qui s'explique en remarquant que dans ce cas le facteur de puissance est voisin de zéro.

*Force électromotrice sinusoïdale*  $E = E_m \sin \omega t$ , agissant sur un circuit présentant de la capacité  $C$  et de la résistance  $R$ .

Imaginons qu'aux extrémités de la résistance  $R$  figurée par les lignes en zigzag nous ayons une force électromotrice  $E_{\text{max}} \sin \omega t$  et que de plus une capacité  $C$  soit intercalée dans le circuit (*fig 92*).

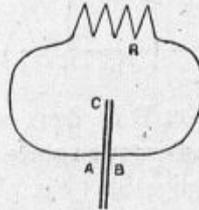
En désignant par  $u$  la différence de potentiel aux bornes à un instant donné, l'on aura :

$$E_{\max} \sin \omega t - u = RI,$$

d'où en différentiant

$$\omega E_{\max} \cos \omega t - \frac{\partial u}{\partial t} = R \frac{\partial I}{\partial t},$$

Fig. 92.



et comme la variation de la charge  $C du$  est égale à la quantité d'électricité mise en mouvement

$$C du = I dt,$$

ce qui nous fournit l'équation différentielle

$$\omega E_{\max} \cos \omega t - \frac{I}{C} = R \frac{\partial I}{\partial t}.$$

Les méthodes connues d'intégration nous conduisent au résultat

$$I = \frac{E_{\max}}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}} \sin(\omega t + \varphi),$$

avec la condition

$$\text{tang } \varphi = \frac{1}{\omega CR},$$

c'est-à-dire

$$\varphi = \text{arc tang } \frac{1}{\omega CR}.$$

On voit par là l'effet d'un condensateur dans un circuit; il y a un décalage en avant sur la force électromotrice, effet opposé à celui d'une self-induction.

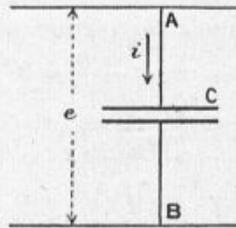
En particulier, pour  $R = 0$ , on a

$$\text{tang } \varphi = \infty,$$

ce qui revient à dire que le décalage est de  $\frac{1}{4}$  de période.

Pratiquement, nous réaliserons ce cas en intercalant un conden-

Fig. 93.

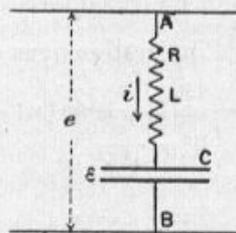


sateur entre les bornes A et B de deux conducteurs parcourus par un courant alternatif, et en faisant en sorte que la résistance ohmique du conducteur AB soit négligeable (*fig. 93*).

*Force électromotrice sinusoïdale agissant sur un circuit de résistance R, de capacité C, et de self-induction L.*

En donnant aux lettres les significations connues on obtient, par

Fig. 94.



application des lois d'induction au circuit ACB (*fig. 94*), la relation

$$E_{\max} \sin \omega t - RI - \varepsilon = L \frac{\partial I}{\partial t},$$

et, en différentiant,

$$\omega E_{\max} \cos \omega t - R \frac{\partial I}{\partial t} - \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = L \frac{\partial^2 I}{\partial t^2}.$$

D'ailleurs  $\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{C} \frac{I}{e}$ , ce qui nous donne, pour la détermination de

l'intensité

$$\omega E_{\max} \cos \omega t - R \frac{\partial I}{\partial t} - \frac{I}{C} = L \frac{\partial^2 I}{\partial t^2}.$$

L'intégration, subordonnée au régime permanent, donne, pour l'intensité  $I$ , l'expression

$$I = \frac{E_{\max}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \sin(\omega t - \varphi),$$

avec la condition

$$\operatorname{tang} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

Dans ces expressions, le terme  $\omega L - \frac{1}{\omega C}$  est désigné sous le nom de *réactance*; on voit qu'il sera nul dans le cas où l'on aura

$$\omega L = \frac{1}{\omega C},$$

c'est-à-dire

$$\omega^2 = \frac{1}{LC};$$

or, comme  $\omega T = 2\pi$ , en appelant  $T$  la durée de la période de la force électromotrice, on obtient

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = \frac{1}{LC},$$

où  $T = 2\pi\sqrt{LC}$  pour la durée de cette période. Si cette condition est réalisée :

$$\operatorname{tang} \varphi = 0,$$

$$I = \frac{E_{\max}}{R} \sin \omega t,$$

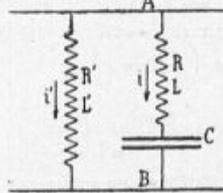
et il y a concordance de phase entre l'intensité et la force électromotrice.

Ces diverses particularités nous permettent d'obtenir facilement des courants polyphasés.

En effet, considérons deux fils de ligne entre lesquels s'exerce une tension alternative et branchons entre ces deux fils deux circuits présentant tous deux de la résistance et de la self-induction et dont un seul aura une certaine capacité comme nous l'indiquons par la

figure 95; le décalage entre les intensités  $i$  et  $i'$  sera variable avec la grandeur des divers coefficients et l'on conçoit qu'il soit possible de disposer de ces coefficients de telle sorte qu'il soit de  $\frac{\pi}{2}$ .

Fig. 95.



Une disposition également très employée consiste à mettre en dérivation sur un circuit deux capacités différentes comme l'indique la

Fig. 96.

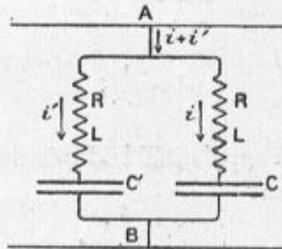


figure 96. On obtient dans les circuits secondaires des courants décalés et l'on peut disposer plus facilement de leurs constantes pour que le décalage soit de  $\frac{\pi}{2}$ .

#### *Énergie d'un courant alternatif.*

Ce courant est défini par sa force électromotrice et son intensité

$$e = E_{\max} \sin \omega t,$$

$$i = I_{\max} \sin(\omega t \pm \varphi).$$

Par suite la variation d'énergie pour un temps  $dt$  sera

$$d\omega = ei dt = E_m I_{\max} \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) dt.$$

On obtient donc pour une période

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{E_m I_{\max}}{T} \int_0^T \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) dt \\ &= \frac{E_m I_{\max}}{T} \left( \cos \varphi \int_0^T \sin^2 \omega t dt \pm \sin \varphi \int_0^T \sin \omega t \cos \omega t dt \right) \\ &= \frac{E_m I_{\max}}{T} \left( \frac{T}{2} \cos \varphi \right) \\ &= \frac{E_m I_{\max}}{2} \cos \varphi, \end{aligned}$$

et, par suite,

$$\omega = E_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos \varphi.$$

Cette énergie, que l'on pourrait désigner sous le nom d'énergie totale périodique, est équivalente à l'énergie dépensée dans le circuit extérieur pendant le même temps.

En effet, on a, en désignant par P cette dernière,

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T RI_m^2 \sin^2(\omega t \pm \varphi) dt = \frac{RI_m^2}{2},$$

or

$$I_{\max} = \frac{E_{\max}}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}},$$

ce qui donne

$$\begin{aligned} P &= \frac{R}{2} \frac{E_m^2}{R^2 + L^2 \omega^2} \\ &= \frac{R}{\sqrt{L^2 \omega^2 + R^2}} \times \frac{E_m}{\sqrt{2} \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}} \times \frac{E_m}{\sqrt{2}} = E_{\text{eff}} \times I_{\text{eff}} \times \cos \varphi, \end{aligned}$$

et, par suite,

$$P = \omega.$$

Mais, si ces deux puissances sont égales pour une période, il n'en est pas de même à un instant donné; en effet, une partie de la puissance instantanée  $ei$  est emmagasinée par les effets de la self-induction, de sorte qu'en désignant par P' cette dernière, on a les égalités

$$\begin{aligned} P' &= Li \frac{\partial i}{\partial t}, \\ ei &= Ri^2 + Li \frac{\partial i}{\partial t}; \end{aligned}$$

il est enfin évident que  $\int_0^T L i \frac{\partial i}{\partial t}$  est nulle pour une période donnée; en effet

$$P' = \frac{\omega L E^2}{2(R^2 + L^2 \omega^2)} \sin 2(\omega t - \varphi),$$

et

$$\int_0^T \sin 2(\omega t - \varphi) dt = 0.$$

*Énergie en polyphasés.* — Cette énergie se déduit le plus souvent du résultat précédent; mais on peut également la calculer directement.

Comme exemple considérons les courants triphasés définis par les systèmes d'égalités (1) et (2) :

$$(1) \quad \begin{cases} e_1 = E_m \sin \omega t, \\ e_2 = E_m \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right), \\ e_3 = E_m \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right); \end{cases}$$

$$(2) \quad \begin{cases} i_1 = I_m \sin(\omega t - \varphi), \\ i_2 = I_m \sin \left( \omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3} \right), \\ i_3 = I_m \sin \left( \omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3} \right). \end{cases}$$

La puissance totale sera donnée par l'expression

$$dw = (e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3) dt,$$

c'est-à-dire

$$w = \int (e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3) dt;$$

on trouve

$$w = \frac{3}{2} E_{\max} I_{\max} \cos \varphi.$$

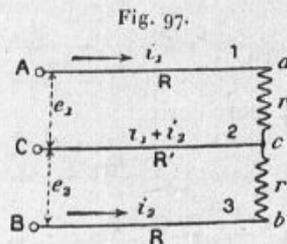
Cette formule se modifie d'ailleurs suivant les canalisations employées, comme l'indique le paragraphe suivant.

§ 2. — Canalisation et puissance en polyphasés.

Le but de ce paragraphe est de prévoir, par application des lois fondamentales de l'Électrocinétique, des relations importantes entre les intensités, les tensions et les résistances dans les lignes d'une transmission polyphasée.

Nous supposerons les divers circuits dénués de self-induction, également chargés, et nous limiterons le calcul aux cas les plus simples.

1° CANALISATIONS BIPHASÉES. — Examinons le cas le plus souvent utilisé dans la pratique, consistant dans l'emploi des deux forces électromotrices biphasées avec le fil commun de retour (fig. 97).



Ces forces électromotrices seront supposées déterminées par les égalités

$$\begin{aligned} V_A - V_C &= e_1 = E_{\max} \sin \omega t, \\ V_B - V_C &= e_2 = -E_{\max} \cos \omega t. \end{aligned}$$

Les inconnues à chercher seront tout d'abord les intensités  $i_1$ ,  $i_2$ , puis les différences de potentiel aux bornes réceptrices, enfin l'énergie du système.

a. *Calcul des intensités.* — Appliquons la deuxième loi de Kirchhoff à chacun des circuits constitués par l'un des fils de résistance  $R$  et le fil commun de résistance  $R'$ .

On obtient les égalités

$$(x) \quad \begin{cases} e_1 = (R + r)i_1 + R'(i_1 + i_2), \\ e_2 = (R + r)i_2 + R'(i_1 + i_2). \end{cases}$$

En les additionnant, on a

$$e_1 + e_2 = (i_1 + i_2)(R + 2R' + 2r),$$

d'où

$$(1) \quad i_1 + i_2 = \frac{e_1 + e_2}{R + r + 2R'} = \frac{E_{\max}}{R + r + 2R'} (\sin \omega t - \cos \omega t) \\ = \frac{E_m \sqrt{2}}{R + r + 2R'} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{4} \right).$$

On aura de même, en retranchant l'une de l'autre les égalités (a)

$$(2) \quad i_1 - i_2 = \frac{e_1 - e_2}{R + r} = \frac{E_{\max}}{R + r} (\sin \omega t + \cos \omega t) = \frac{E_m \sqrt{2}}{R + r} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{4} \right).$$

Connaissant la somme et la différence des deux intensités  $i_1$  et  $i_2$ , on déduit par une règle connue

$$(a') \quad \begin{cases} i_1 = \frac{E_m \sqrt{2}}{2(R + r + 2R')} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{4} \right) + \frac{E_m \sqrt{2}}{2(R + r)} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{4} \right), \\ i_2 = \frac{E_m \sqrt{2}}{2(R + r + 2R')} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{4} \right) - \frac{E_m \sqrt{2}}{2(R + r)} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{4} \right), \end{cases}$$

égalités que l'on peut encore écrire

$$(a'') \quad \begin{cases} i_1 = \frac{1}{2} \sin \omega t \left( \frac{E_m}{R + r + 2R'} + \frac{E_m}{R + r} \right) \\ \quad - \frac{1}{2} \cos \omega t \left( \frac{E_m}{R + r + 2R'} - \frac{E_m}{R + r} \right), \\ i_2 = \frac{1}{2} \sin \omega t \left( \frac{E_m}{R + r + 2R'} - \frac{E_m}{R + r} \right) \\ \quad - \frac{1}{2} \cos \omega t \left( \frac{E_m}{R + r + 2R'} + \frac{E_m}{R + r} \right). \end{cases}$$

Sous cette dernière forme, on voit que le maximum de  $i_1$  et de  $i_2$  est

$$(i_1)_{\max}^2 = \frac{1}{4} \left( \frac{E_m}{R + r + 2R'} + \frac{E_m}{R + r} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{E_m}{R + r + 2R'} - \frac{E_m}{R + r} \right)^2 \\ = \frac{1}{2} \left( \frac{E_m}{R + r + 2R'} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{E_m}{R + r} \right)^2 \\ = \frac{1}{2} \left( \frac{E_m}{R + r + 2R'} \right)^2 \left[ 1 + \left( \frac{R + r + 2R'}{R + r} \right)^2 \right].$$

Finalement

$$i_{1 \max} = \frac{E_m}{\sqrt{2}(R + r + 2R')} \sqrt{1 + \left( \frac{R + r + 2R'}{R + r} \right)^2}.$$

Comparons  $i_{1\max}$  avec  $(i_1 + i_2)_{\max}$ ; on obtient

$$\frac{(i_1 + i_2)_{\max}}{i_{1\max}} = \frac{2}{\sqrt{1 + \left(\frac{R+r+2R'}{R+r}\right)^2}},$$

et en admettant que le dénominateur est sensiblement égal à  $\sqrt{2}$ , ce qui a lieu dans la pratique,

$$(A) \quad \frac{(i_1 + i_2)_{\max}}{i_{1\max}} = \sqrt{2}.$$

D'où les conclusions suivantes :

- 1° Les courants de ligne  $i_1$  et  $i_2$  sont décalés entre eux et par rapport à la force électromotrice génératrice;
- 2° Le courant qui traverse le fil unique de retour est décalé en arrière de  $45^\circ$  par rapport à la force électromotrice et décalé d'un certain angle par rapport aux courants de ligne  $i_1$  et  $i_2$ ;
- 3° Le rapport des tensions efficaces du courant traversant le fil unique et des courants de ligne est sensiblement  $\sqrt{2}$ .

b. Calcul des forces électromotrices aux bornes et de l'énergie du système. — On aura, en appliquant la formule d'Ohm :

$$(\beta) \quad \begin{cases} V_a - V_c = r i_1, \\ V_b - V_c = r i_2, \end{cases}$$

le système  $(\beta)$  nous donnant les forces électromotrices aux bornes réceptrices.

On obtiendrait de même aux bornes génératrices

$$V_A - V_B = e_1 - e_2 = E_{\max}(\cos \omega t + \sin \omega t) = E_{\max} \sqrt{2} \sin(\omega t + 45^\circ),$$

ce qui revient à dire que la force électromotrice efficace dans les bornes extrêmes du système à fil unique de retour est  $\sqrt{2}$  fois plus grande qu'entre ce fil unique et l'un quelconque des deux autres; il en serait de même aux bornes réceptrices, car le système  $(b)$  nous fournit

$$V_a - V_b = r(i_1 - i_2),$$

et du système  $(\alpha)$  nous tirons

$$i_1 - i_2 = \frac{e_1 - e_2}{R + r}.$$

ce qui donne

$$e = V_a - V_b = \frac{r}{R+r} E_{\max} \sqrt{2} \sin(\omega t + 45^\circ),$$

alors que dans l'enroulement à quatre fils on aura

$$e = \frac{r}{R+r} E_{\max} \sin \omega t.$$

Cette considération nous montre l'inconvénient du système biphasé à fil unique : il y a aux bornes extrêmes réceptrices une tension efficace  $\sqrt{2}$  fois plus grande que dans le système à quatre fils, ce qui exige un isolement spécial des appareils récepteurs.

Enfin, en ce qui concerne l'énergie, nous aurons les égalités suivantes :

Énergie perdue dans le récepteur.....	$W' = 2r I_{\text{eff}}^2$
Énergie perdue dans les fils de ligne...	$W'' = 2RI_{\text{eff}}^2 + R'(i_1 + i_2)_{\text{eff}}^2$
Énergie totale.....	$W = W' + W''$

On pourrait discuter ces diverses énergies en prenant comme variables les sections  $S$  et  $S'$  des fils de ligne, le volume  $V$  ou le poids  $P$  du métal employé; on trouverait notamment que  $W''$  passe par un minimum quand on a  $\frac{S'}{S} = \sqrt{2}$ ,

Nous n'examinerons que la comparaison de la perte ohmique  $W''$  avec celle résultant de l'emploi de courants biphasés à quatre fils ou de courants alternatifs simples, ces divers systèmes fonctionnant avec une même tension efficace génératrice.

Pour la ligne à quatre fils, la perte ohmique est

$$W_1 = 4RI^2,$$

alors que l'on a

$$W' = 2RI^2 + R'(i_1 + i_2)_{\text{eff}}^2.$$

Cette dernière expression peut se transformer; en effet, pour le minimum, on a sensiblement

$$\frac{R'}{R} = \sqrt{2}, \quad (i_1 + i_2)_{\text{eff}} = I\sqrt{2},$$

de telle sorte que

$$W' = 2RI^2 + \frac{R}{\sqrt{2}} (I\sqrt{2})^2 = RI^2 \left( 2 + \frac{2}{\sqrt{2}} \right).$$

Il vient par suite

$$\frac{W'}{W_1} = \frac{2 + \frac{2}{\sqrt{2}}}{4} = 0,853.$$

Cette comparaison nous montre nettement l'avantage de la ligne biphasée à trois fils.

Désignons de même par  $W_2$  la perte ohmique qui aurait lieu dans une ligne à courant alternatif simple fonctionnant avec la force électromotrice  $E\sqrt{2}$  des fils extrêmes.

On aurait

$$W_2 = 2R(I\sqrt{2})^2 = 4RI^2,$$

et par suite

$$\frac{W'}{W_2} = \frac{2 + \frac{2}{\sqrt{2}}}{4} = 0,853.$$

Il y a encore intérêt à utiliser la canalisation biphasée à trois fils.

Enfin, si l'on veut réaliser des pertes identiques, on obtient pour le rapport des résistances le même nombre. On aura donc

$$\frac{\text{Résistance biphasée à quatre fils ou alternative simple}}{\text{Résistance biphasée à trois fils}} = 0,853.$$

Un calcul très simple nous montrerait que les poids de cuivre employés sont sensiblement dans le rapport de 75 pour 100.

On voit là l'économie réalisée par la canalisation que nous venons d'étudier.

2° CANALISATIONS TRIPHASÉES. — On peut réaliser pratiquement quatre cas différents suivant que les enroulements générateurs ou récepteurs sont montés tous deux en étoile, tous deux en triangle ou l'un en étoile et l'autre en triangle.

On se donnera les tensions alternatives polyphasées génératrices, et l'on se proposera de calculer suivant les cas :

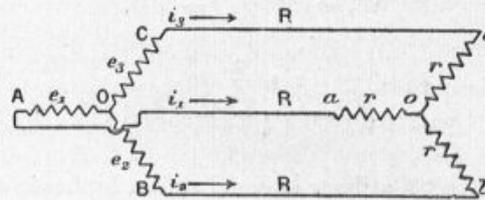
- 1° Les intensités dans les fils de ligne ;
- 2° Les intensités dans les réceptrices ;
- 3° Les différences de tension entre les fils de ligne ;
- 4°       »       »       aux bornes génératrices ;
- 5°       »       »       aux réceptrices.

Enfin, les lignes peuvent être supposées également ou non chargées.

On conçoit donc la difficulté du problème que nous n'aborderons qu'à un point de vue restreint et dans les cas particuliers suivants.

*Générateur et récepteur montés en étoile.* — Désignons par  $e_1, e_2, e_3$  les trois tensions décalées, par  $R$  la résistance commune des fils de ligne parcourus par les courants  $i_1, i_2, i_3$ , et par  $r$  la résistance de chacune des branches de l'étoile réceptrice (*fig. 98*).

Fig. 98.



Canalisations triphasées en étoile.

1° *Calcul des intensités.* — Il est d'abord évident que les intensités des fils de ligne se retrouvent dans les branches de la réceptrice; on sait, d'ailleurs, que l'on peut réunir les centres des deux étoiles sans apporter aucune perturbation au système; ce fil commun  $O_o$ , supprimé dans la figure, constituera donc, avec chacun des autres fils, trois circuits distincts auxquels on pourra appliquer la deuxième loi d'Ohm, ce qui fournit les équations de la forme :

$$e_1 = (R + r) i_1.$$

On en déduit le système ( $\alpha$ ) :

$$(\alpha) \quad \begin{cases} i_1 = \frac{e_1}{R + r} = \frac{E_{\max}}{R + r} \sin \omega t, \\ i_2 = \frac{e_2}{R + r} = \frac{E_{\max}}{R + r} \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right), \\ i_3 = \frac{e_3}{R + r} = \frac{E_{\max}}{R + r} \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right). \end{cases}$$

D'où la conclusion :

*Les intensités dans les fils de ligne et, par suite, dans les branches de l'étoile réceptrice, sont triphasées entre elles; elles*

sont en concordance de phase avec les forces électromotrices qui les produisent, et leur valeur efficace commune est

$$I_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{(4R + r)}.$$

2° *Calcul de la différence de potentiel aux bornes.* — En ce qui concerne l'étoile génératrice, on a

$$\begin{aligned} E_1 &= V_A - V_B = e_1 - e_2 = E_{\text{max}} \sqrt{3} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right), \\ E_2 &= V_B - V_C = e_2 - e_3 = \\ E_3 &= V_C - V_A = e_3 - e_1 = \end{aligned}$$

ce qui nous indique un système également triphasé pour les forces électromotrices aux bornes, la valeur efficace commune de ces forces électromotrices étant

$$\frac{E_{\text{max}} \sqrt{3}}{\sqrt{2}}.$$

Si l'on compare cette valeur  $E'_{\text{eff}}$  avec celle correspondant aux branches de l'étoile  $e_{\text{eff}}$ , on obtient la relation

$$(1) \quad E'_{\text{eff}} = E_{\text{eff}} \sqrt{3},$$

qui nous fournit

$$(1') \quad \frac{E'_{\text{eff}}}{\sqrt{3}(R + r)}.$$

D'où la remarque suivante :

*Dans une canalisation en étoiles pour triphasés, la différence de potentiel efficace aux bornes est  $\sqrt{3}$  fois plus grande que celle relative à une borne et le centre de l'étoile.*

Il est évident, d'ailleurs, que la même remarque s'étend à l'étoile réceptrice; nous aurons donc, entre le centre O et l'une ou l'autre des extrémités  $a, b, c$  de cette étoile, une différence de potentiel efficace égale à  $rI_{\text{eff}}$  alors que, entre les bornes réceptrices, cette différence efficace sera  $rI_{\text{eff}}\sqrt{3}$ .

*Application du calcul de l'énergie.* — L'énergie génératrice étant la somme des énergies correspondantes à chaque force électro-

motrice, aura pour expression

$$W = 3 I_{\text{eff}} E_{\text{eff}},$$

et, en vertu de la relation précédente,

$$W = I_{\text{eff}} E'_{\text{eff}} \sqrt{3},$$

relation que l'on peut traduire en disant :

*L'énergie d'un système triphasé étoilé s'obtient en multipliant l'intensité efficace des fils de ligne par la force électromotrice efficace entre deux quelconques de ces fils, et le tout par 1,732.*

Une partie de cette énergie sera perdue dans les fils de ligne; elle est égale à  $3 R I_{\text{eff}}^2$ .

La seconde partie sera l'énergie utile  $W'$  animant le récepteur; on peut vérifier qu'elle est égale à la différence entre l'énergie totale et l'énergie perdue, ce qui indique l'égalité suivante :

$$(2) \quad W' = W - 3 R I_{\text{eff}}^2.$$

En effet, on a

$$W' = 3 r I_{\text{eff}}^2,$$

ce qui conduirait à l'égalité

$$W = 3(R + r) I_{\text{eff}}^2 = E'_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \sqrt{3},$$

or

$$I_{\text{eff}} = \frac{E'_{\text{eff}}}{\sqrt{3}(R + r)} \quad \text{d'après (1')}.$$

En remplaçant, on obtient une identité.

Le rendement sera évidemment

$$\frac{W'}{W} = \frac{r}{R + r}.$$

Comparons cette canalisation à un système alternatif simple fonctionnant avec la même force électromotrice efficace  $E'$ . On aura pour les pertes ohmiques

$$W_1 = \text{Pertes en triphasés} = 3R \left[ \frac{E'}{(R + R)\sqrt{3}} \right]^2 = \frac{(E')^2}{R},$$

$$W_2 = \text{Pertes en alternatif simple} = 2R' \left( \frac{E'}{2R'} \right)^2 = \frac{(E')^2}{2R'};$$

et, par suite,

$$\frac{W_1}{W_2} = 2 \frac{R'}{R}.$$

Admettons l'égalité dans les pertes ohmiques ; on en déduit

$$2R' = R,$$

et, par suite, en désignant par S et S' les sections correspondantes

$$2S = S',$$

d'où la conclusion suivante :

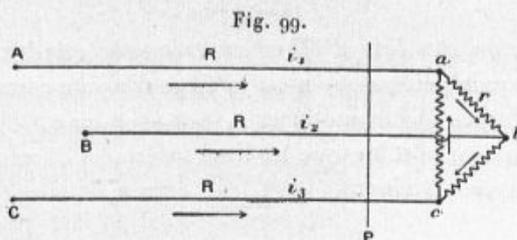
*La section, dans une canalisation triphasée en étoile, est, à pertes égales, la moitié de celle correspondante à une canalisation alternative simple.*

Le rapport des volumes du cuivre employé sera

$$\frac{3 \frac{S'}{2}}{2S'} = \frac{3}{4}.$$

Il y a donc encore, dans ce cas, avantage pour les courants triphasés.

RÉCEPTRICE MONTÉE EN TRIANGLE. — Nous représentons schématiquement ce cas par la figure suivante 99.



Les données sont les forces électromotrices génératrices

$$(a) \quad \begin{cases} V_A - V_B = e_1 = E_{\max} \sin \omega t, \\ V_B - V_C = e_2 = E_{\max} \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right), \\ V_C - V_A = e_3 = E_{\max} \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right), \end{cases}$$

ainsi que les résistances R et r.

Il s'agit de calculer les intensités  $i_1, i_2, i_3, i_{ab}, i_{bc}, i_{ca}$ . A cet effet, appliquons les égalités d'Ohm aux deux enroulements.

1° *Application des lois d'Ohm au triangle récepteur.* — On obtient

$$(1) \quad i_{ab} + i_{bc} + i_{ca} = 0,$$

$$(a') \quad \begin{cases} i_{ac} + i_1 = i_{ab}, \\ i_{bc} + i_3 = i_{ac}, \\ i_{ab} + i_2 = i_{bc}. \end{cases}$$

En additionnant les égalités (a') l'on déduit

$$(2) \quad i_1 + i_2 + i_3 = 0,$$

en les soustrayant deux à deux, l'on aura

$$(a'') \quad \begin{cases} i_{ab} = \frac{i_1 - i_2}{3}, \\ i_{bc} = \frac{i_2 - i_3}{3}, \\ i_{ca} = \frac{i_3 - i_1}{3}. \end{cases}$$

2° *Application des lois d'Ohm au triangle générateur.* — A l'origine le triangle générateur n'est le siège d'aucun courant puisque la somme des forces électromotrices  $e_1 + e_2 + e_3 = 0$ .

En marche normale et lorsque les lignes dénuées d'inductance sont également chargées, il vient

$$(a''') \quad \begin{cases} V_A - V_B = e_1 = R(i_1 - i_2) + r i_{ab}, \\ V_B - V_C = e_2 = R(i_2 - i_3) + r i_{bc}, \\ V_C - V_A = e_3 = R(i_3 - i_1) + r i_{ca}. \end{cases}$$

3° *Comparaison des résultats.* — Dans le système (a''') remplaçons  $i_1 - i_2, i_2 - i_3, i_3 - i_1$  par les valeurs que nous donne (a''), on aura des égalités de la forme

$$e_1 = (3R + r)i_{ab},$$

c'est-à-dire le système

$$(\beta) \quad \begin{cases} i_{ab} = \frac{e_1}{3R+r} = \frac{E_{\max}}{3R+r} \sin \omega t, \\ i_{bc} = \frac{e_2}{3R+r} = \frac{E_{\max}}{3R+r} \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right), \\ i_{ca} = \frac{e_3}{3R+r} = \frac{E_{\max}}{3R+r} \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right), \end{cases}$$

on en tire les conséquences suivantes :

*Les intensités dans l'enroulement récepteur sont en concordance de phase avec les forces électromotrices correspondantes et leur valeur efficace commune*  $I_{abc} = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}(3R+r)}$ .

Le système ( $\alpha''$ ) se transforme facilement et devient

$$(\beta') \quad \begin{cases} e_1 = (i_1 - i_2) \left( R + \frac{r}{3} \right), \\ e_2 = (i_2 - i_3) \left( R + \frac{r}{3} \right), \\ e_3 = (i_3 - i_1) \left( R + \frac{r}{3} \right), \end{cases}$$

d'où l'on déduit des égalités de la forme

$$e_1 - e_3 = \left( R + \frac{r}{3} \right) (2i_1 - i_2 - i_3) = 3i_1 \left( R + \frac{r}{3} \right)$$

et, par suite, le système ( $\beta''$ )

$$(\beta'') \quad \begin{cases} i_1 = \frac{e_1 - e_3}{3R+r} = \frac{E_{\max} \sqrt{3}}{3R+r} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{6} \right), \\ i_2 = \frac{e_2 - e_1}{3R+r} = \frac{E_{\max} \sqrt{3}}{3R+r} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{6} - \frac{2\pi}{3} \right), \\ i_3 = \frac{e_3 - e_2}{3R+r} = \frac{E_{\max} \sqrt{3}}{3R+r} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{6} - \frac{4\pi}{3} \right). \end{cases}$$

D'où la nouvelle conclusion :

*Les intensités dans les fils de ligne sont décalées de 30° par rapport aux forces électromotrices génératrices, elles sont tri-*

phasées et leur valeur efficace commune  $I_{ABC} = \frac{E_{\max} \sqrt{3}}{\sqrt{2}(3R+r)}$  est  $\sqrt{3}$  fois plus grande que celle des courants dans la réceptrice.

Le calcul des énergies relatives devient alors très simple.

On a, en effet,

$$\text{Énergie au récepteur : } W' = 3 r I_{abc}^2 = r I_{ABC}^2,$$

$$\text{Énergie de transport : } = 3 R I_{ABC}^2.$$

De telle sorte que l'énergie totale  $W$  devient

$$W = (3R + r) I_{ABC}^2,$$

et comme

$$I_{ABC} = \frac{E_{\text{eff}} \sqrt{3}}{3R + r},$$

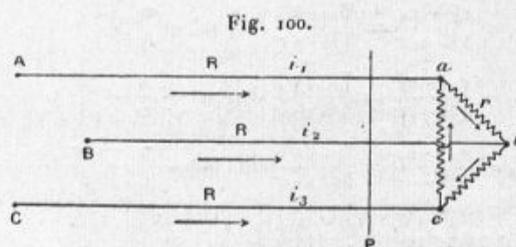
on obtient encore l'expression

$$W = E_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \sqrt{3}.$$

Le rendement  $\frac{W'}{W}$  est encore égal au rapport  $\frac{r}{3R+r}$ . Une discussion analogue à celle des cas précédents nous montrerait facilement que, à égalité de puissance et pour une même perte ohmique, il y a encore économie de poids de cuivre sur toute canalisation alternative simple ou continue.

COMPTEURS D'ÉNERGIE TRIPHASÉS. — Les considérations générales précédentes nous permettent de nous rendre compte exactement de l'emploi des divers compteurs pour courants polyphasés.

Considérons une réceptrice montée en triangle (*fig. 100*),



et cherchons l'expression générale de la puissance dans l'ensemble des circuits récepteurs.

On a, pour cette grandeur W, l'égalité

$$W = (V_a - V_b)i_{ab} + (V_b - V_c)i_{bc} + (V_c - V_a)i_{ac},$$

or, nous avons vu que l'on avait

$$i_{ab} = \frac{i_1 - i_2}{3},$$

$$i_{bc} = \frac{i_2 - i_3}{3},$$

$$i_{ca} = \frac{i_3 - i_1}{3}.$$

L'expression précédente devient alors

$$W = \frac{1}{3}[(V_a - V_c)(i_1 - i_2) + (V_b - V_c)(i_2 - i_3) + (V_c - V_a)(i_3 - i_1)].$$

On conçoit donc d'après cette expression une méthode générale pour trouver l'énergie dans un système triphasé; il suffira d'employer trois wattmètres que l'on disposera de telle façon que chacun d'eux mesure l'un des termes de la somme précédente.

Ce dispositif est somme toute assez compliqué, aussi a-t-on cherché à le simplifier; nous en comprendrons la possibilité par les remarques suivantes :

Après avoir remarqué que la somme des trois différences de potentiel aux sommets du triangle récepteur est évidemment nulle, ce qu'indique l'égalité

$$(V_a - V_b) + (V_b - V_c) + (V_c - V_a) = 0.$$

Retranchons de l'expression de W la quantité

$$i_{ab}[(V_a - V_b) + (V_b - V_c) + (V_c - V_a)],$$

on obtient

$$W = (V_a - V_b)i_{ab} + (V_b - V_c)i_{bc} + (V_c - V_a)i_{ac} - i_{ab}[(V_a - V_b) + (V_b - V_c) + (V_c - V_a)]$$

que l'on peut écrire

$$W = (V_b - V_c)(i_{bc} - i_{ab}) - (V_c - V_a)(i_{ab} - i_{ac}) = (V_b - V_c)i_2 - (V_c - V_a)i_1.$$

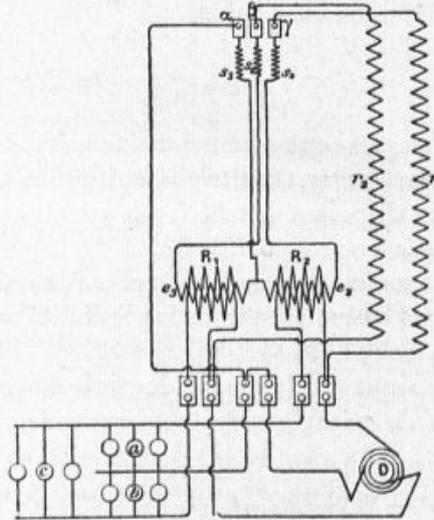
Cette égalité nous montre que l'énergie en triphasés pourra se déterminer expérimentalement au moyen de deux wattmètres connectés

de telle façon que leurs bobines soient animées par les différences de potentiel et les intensités qu'indique la formule.

Ces connections sont d'ailleurs très faciles à établir; en effet, le premier terme  $(V_b - V_c)i_2$  nous montre que, dans le premier wattmètre, la bobine à gros fil devra mesurer  $i_2$  et, par conséquent, être parcourue par ce courant  $i_2$  alors que la bobine en fil fin sera montée en dérivation entre les conducteurs de ligne 2 et 3.

De même, le terme  $(V_c - V_a)i_1$ , pris négativement, nous indique sans autre explication les liaisons des bobines du deuxième wattmètre.

Fig. 101.



Compteur pour triphasés.

*Note* : Les bobines en gros fil  $R_1$  et  $R_2$  sont parcourues par les courants  $i_1$ ,  $i_2$ ; les bobines en fil fin pouvant osciller, sériees avec les résistances  $r_1$ ,  $r_2$ , sont montées en dérivation sur les différences de potentiel  $e_1 = V_a - V_c$  et  $e_2 = V_b - V_c$ .

Nous indiquons ci-contre (*fig.* 101), le schéma d'un tel compteur d'énergie.

### III. — Générateurs mono- et polyphasés.

**GÉNÉRATEUR MONOPHASÉ.** — Prenons comme exemple type de générateur monophasé la machine Gramme bipolaire (*fig.* 102) et cherchons la force électromotrice induite dans une spire.

Désignons par  $\Phi$  le flux total traversant l'anneau représenté sur la figure; il est évident que  $\frac{\Phi}{2}$  correspondra à chaque moitié, de telle

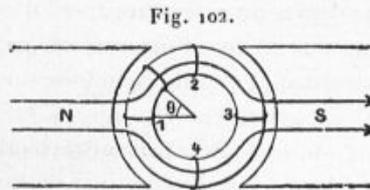


Fig. 102.

Spire tournant dans un champ bipolaire.

sorte que ce flux, nul pour la position 1, maximum pour la position 2, sera représenté, pour un angle  $\theta$ , par la valeur

$$\mathcal{F} \mathcal{F} l = \frac{\Phi}{2} \sin \theta.$$

On en déduit, pour la force électromotrice cherchée,

$$e = \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial t} = \frac{\Phi}{2} \cos \theta \frac{\partial \theta}{\partial t}.$$

Mais  $\theta = \omega t$ ,  $\omega$  étant la vitesse angulaire qui est égale à  $2N\pi$ , en désignant par  $N$  le nombre de tours fait par la spire tournante en 1 seconde; d'où

$$E = N\pi\Phi \cos \theta.$$

Supposons un enroulement continu et cherchons la différence de potentiel  $E$  aux extrémités de la ligne neutre; à cet effet, faisons remarquer qu'il est possible de diviser les spires en petites tranches comprises entre deux angles  $\theta$  et  $\theta + d\theta$ , de telle sorte que, si l'on désigne par  $n_1$  le nombre de spires par unité d'angle, nous aurons  $n_1 d\theta$  spires dont l'action sera

$$dE = N\pi\Phi \cos \theta \times n_1 d\theta;$$

d'où

$$E = N\pi\Phi n_1 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \cos \theta d\theta = 2Nn_1\pi\Phi,$$

et comme  $2n_1\pi = N'$ , nombre total de spires, on obtient finalement

$$E = NN'\Phi$$

pour la force électromotrice fournie par la machine Gramme; mais, en réalité, l'enroulement n'est pas continu, et nous ne sommes en droit d'appliquer l'intégrale précédente qu'aux extrémités des sections aboutissant aux lames du collecteur.

On voit facilement que la force électromotrice, pour une section comprise entre les angles  $\theta$  et  $\theta + \beta$ , sera

$$E' = N\pi\Phi n_1 \int_0^{\theta+\beta} \cos\theta d\theta = N\pi\Phi n_1 [\sin\theta + b) - \sin\theta].$$

On voit donc que, à un instant donné, les différentes sections seront le siège de forces électromotrices sinusoïdales et polyphasées.

Le collecteur de la dynamo Gramme fonctionnera donc comme un appareil produisant la somme de ces forces électromotrices.

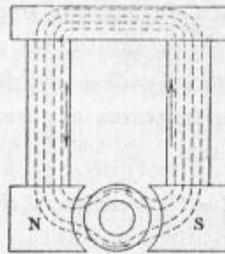
Si l'on supprime le collecteur, on pourra recueillir aux extrémités de chaque section des courants alternatifs décalés.

En examinant de même ce qui concerne la dynamo multipolaire, on obtient pour la force électromotrice totale induite la même expression  $E = Nn\Phi$  que pour une machine bipolaire; d'où la conclusion :

*La force électromotrice d'une dynamo est indépendante du nombre des pôles inducteurs.*

On aurait pu se rendre compte de la force électromotrice induite dans une spire de l'anneau Gramme, par la seule considération des

Fig. 103.



lignes de force du système inducteur que nous représentons ci-contre (*fig. 103*).

Cette figure nous indique que le flux traversant la spire est nul lorsqu'elle est parallèle au champ, et maximum lorsqu'elle lui est perpendiculaire, résultats que nous avons précédemment indiqués.

Mais le système de lignes de force précédent ou diagramme de la dynamo est rapidement modifié par la réaction de l'induit, par la variabilité de la perméabilité magnétique des inducteurs et la self-induction, de telle sorte que la direction neutre n'est plus normale à la direction du champ et s'incline d'un certain angle appelé *angle de décalage*.

La symétrie des lignes de force disparaît alors et le diagramme théorique précédent est alors schématiquement représenté par la figure 104.

On voit par ce schéma que la ligne neutre correspondra à la position P'Q' pour laquelle le flux de force est devenu maximum.

Fig. 104.

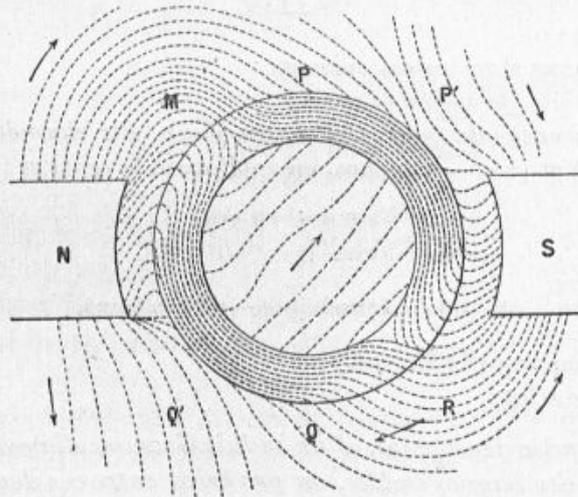


Diagramme du champ électromagnétique dans une dynamo.

Ces généralités sur la dynamo Gramme étant exposées, nous pouvons en déduire l'explication théorique des liaisons de l'induit de cette machine, susceptibles de nous fournir des courants bi ou triphasés, comme nous l'avons indiqué pages 38, 39, 40, Chapitre III.

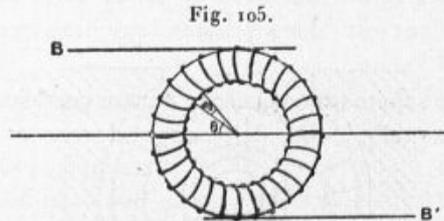
A cet effet, cherchons la différence de potentiel entre une section de l'enroulement et l'un des balais B' par exemple (*fig. 105*); nous venons de montrer que, en appelant  $dE$  la force électromotrice d'une section d'angle  $d\theta$ , on avait

$$dE = k \cos \theta d\theta,$$

ce qui donne, en désignant par  $V$  la lettre indicatrice des potentiels,

$$(1) \quad V_B - V_{\theta} = \gamma \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\theta} \cos \theta \, d\theta = (+k \sin \theta) \Big|_{-\frac{\pi}{2}}^{\theta} = k(t + \sin \theta),$$

relation que nous appellerons *équation fondamentale des potentiels sur un induit*.



Considérons alors les cas suivants :

1° *Différence de potentiel entre deux fils diamétralement opposés (1) et (2).* — On aura, en appliquant la relation (1),

$$V_1 - V_{B'} = k(t + \sin \theta),$$

$$V_2 - V_{B'} = k[t + \sin(\theta + \pi)],$$

d'où l'on tire

$$V_1 - V_2 = k[\sin \theta \sin(\theta + \pi)] = 2k \sin \theta,$$

relation dans laquelle  $\theta = \omega t$ .

On en conclut :

*Si l'on relie deux points d'un induit Gramme diamétralement opposés à des bagues isolées, on produira entre ces deux bagues une force électromotrice alternative.*

C'est le cas de la machine Gramme créatrice de courants alternatifs simples.

2° *Différence de potentiel entre deux groupes orthogonaux de spires diamétralement opposées.* — C'est le cas de la machine Gramme biphasée (fig. 33, Chap. III, p. 39) à deux pôles. L'explication théorique en est très simple; en effet, la force électromotrice existant entre les bagues du premier groupe est, d'après ce qui précède,

$$V_1 - V_2 = 2k \sin \omega t;$$

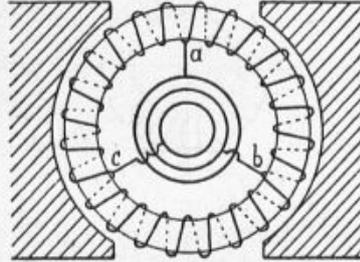
on aura de même entre les bagues (3) et (4) une différence de potentiel

$$V_3 - V_4 = 2k \sin(\omega t + 90^\circ) = -2k \cos \omega t.$$

On voit donc nettement le biphasage des forces électromotrices.

3° Différences de potentiels entre les bagues d'un enroulement

Fig. 106.



Machine Gramme triphasée bipolaire à trois bagues isolées.

*triphase.* — Nous représentons à nouveau un pareil enroulement en coupe (fig. 106).

On obtient également, par application de l'équation fondamentale des potentiels, les égalités

$$\begin{aligned} V_a - V_b &= k \left[ \sin \alpha - \sin \left( \alpha + \frac{2\pi}{3} \right) \right] &&= -k \sqrt{3} \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{3} \right), \\ V_b - V_c &= k \left[ \sin \left( \alpha + \frac{2\pi}{3} \right) - \sin \left( \alpha + \frac{4\pi}{3} \right) \right] &&= -k \sqrt{3} \cos (\omega t + \pi), \\ V_c - V_a &= k \left[ \sin \left( \alpha + \frac{4\pi}{3} \right) - \sin \alpha \right] &&= +k \sqrt{3} \cos \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right), \\ &&&= -k \sqrt{3} \cos \left( \omega t + \frac{5\pi}{3} \right). \end{aligned}$$

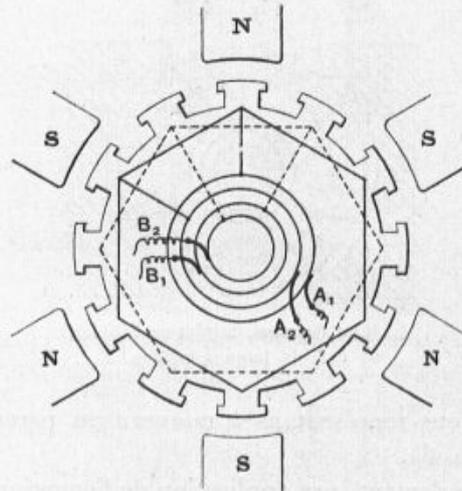
Les forces électromotrices entre les trois bagues prises deux à deux sont donc triphasées.

En dehors des modifications de la dynamo Gramme que nous venons d'étudier, on a vu, page 28, Chapitre III, que les alternateurs polyphasés pouvaient se rapporter à deux types principaux; nous allons exposer la théorie de chacun d'eux :

1<sup>o</sup> GÉNÉRATEURS A BOBINAGES MOBILES OU A INDUCTEURS FIXES — Prenons comme schéma de ces générateurs polyphasés celui indiqué par la figure 107.

On peut admettre sans grande erreur que les effets d'induction appréciables sur une bobine sont ceux relatifs aux pôles à proximité

Fig. 107.



Alternateur biphasé à induit mobile.

desquels elle se trouve. Or, entre deux pôles N et S, les lignes de force peuvent être considérées comme émanant normalement de l'un pour aboutir normalement à l'autre, de telle sorte que toute bobine parallèle à la surface terminale de l'un des pôles sera traversée par un flux maximum alors que, située à égale distance de deux pôles consécutifs, le flux correspondant sera sensiblement nul.

On peut encore comprendre le même fait en remarquant que la couronne de pôles fixes produit, dans l'espace qu'elle entoure, un champ magnétique radial.

De telle sorte que, pour introduire le calcul dans un tel générateur, il nous suffira de trouver l'expression du champ magnétique radial pour une direction quelconque définie par l'angle  $\theta$  que fait cette direction avec une droite fixe  $Ox$  passant par l'un des pôles N, par exemple (*fig 108*).

Désignons par  $\mathcal{H}_m$  la valeur maximum de ce champ et remarquons qu'il passe par trois maxima de même signe dans l'intervalle de  $0$

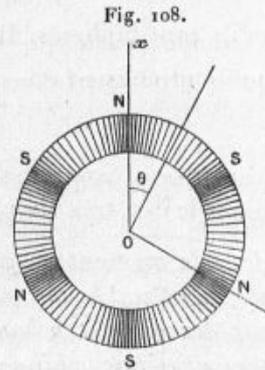


Schéma d'un champ radial.

à  $2\pi$ , de sorte que sa période  $T'$  sera évidemment le tiers de la durée  $T$  d'un tour complet.

D'ailleurs la fonction représentative d'un pareil champ est périodique; en conséquence, le champ radial  $\mathcal{H}$  nous sera fourni à un instant donné par l'expression

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_m \cos 2\pi \frac{t}{\left(\frac{T}{3}\right)};$$

le temps  $t$ , variable arbitraire de cette formule, est d'ailleurs lui-même relié à l'angle de rotation  $\theta$  par la relation

$$\theta = \omega t = \frac{2\pi}{T} t.$$

En définitive, si dans un pareil champ nous considérons deux bobines plates distantes angulairement de  $\frac{\pi}{6}$ , les flux de force qui les traverseront seront

$$\Phi_1 = S \mathcal{H}_m \cos 2\pi \frac{t}{\left(\frac{T}{3}\right)} = S \mathcal{H}_m \cos \theta,$$

$$\Phi_2 = S \mathcal{H}_m \cos 3 \left( \theta + \frac{\pi}{6} \right).$$

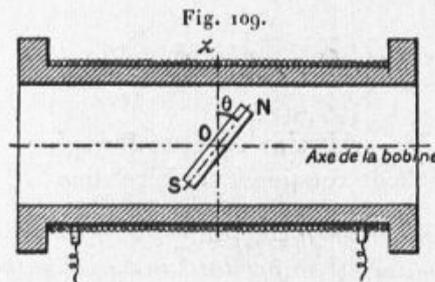
On vérifie facilement sur ces formules que, lorsque l'un d'eux est

maximum, l'autre est nul et réciproquement; comme cette intervention se produit pour une différence de  $\frac{\pi}{6}$  égale au quart de la période  $\frac{2\pi}{3}$ , il s'ensuit qu'ils sont biphasés. Il en sera sensiblement de même des courants qu'ils produisent dans leurs bobines respectives.

2° GÉNÉRATRICES POLYPHASÉES A BOBINAGES FIXES. — Pour en exposer la théorie, imaginons le cas, très simple, théorique suivant :

*Un aimant mobile, dont le moment magnétique M est déterminé, tourne d'un mouvement uniforme autour d'un axe fixe normal à la ligne des pôles et fait n tours par seconde; cet aimant est placé à l'intérieur d'une bobine dont l'axe est normal à l'axe de rotation et dont le circuit est ouvert ou fermé sur lui-même. Trouver la force électromotrice produite par induction aux extrémités de la bobine ou l'intensité du courant qui la parcourt en circuit fermé.*

Soient B la bobine fixe, NS l'aimant tournant autour de l'axe



horizontal projeté en O, normal à celui de la bobine (*fig. 109*) et à la verticale Oz.

Comptons les angles de rotation à partir de cette verticale, de telle sorte que l'on a

$$\theta = \omega t = 2n\pi t.$$

Pour résoudre la question il nous suffira, faisant application du principe fondamental de la conservation de l'énergie, d'écrire l'égalité entre le travail électromagnétique et le travail mécanique, pour une variation  $d\theta$  de la position de l'aimant mobile.

Or, si l'on désigne par  $e$  la force électromotrice cherchée, par  $i$  le courant qui prendrait naissance en circuit fermé, on sait que la variation d'énergie électrique est

$$dW = ei dt.$$

De même, soit  $\mathcal{F}$  le champ de la bobine au point O; ce champ est donné par l'expression

$$\mathcal{F} = 4\pi n_1 I \frac{l}{\sqrt{l^2 + 4R^2}},$$

dans laquelle

$l$  = longueur de la bobine,

$R$  = rayon des spires,

$n_1$  = nombre de spires par centimètre,

et le travail qu'il produira pour une variation  $d\theta$  sera

$$d\bar{e} = \mathcal{F} \cos \theta \times M d\theta.$$

Égalant les valeurs de  $dW$  et de  $d\bar{e}$ , il vient

$$eidt = M \mathcal{F} \cos \theta d\theta = \frac{4\pi n_1 l I}{\sqrt{l^2 + 4R^2}} M \cos \theta d\theta,$$

or,  $d\theta = \omega dt$ .

Donc, finalement et après suppression de  $i dt$  de part et d'autre, on obtient

$$e = \frac{4\pi n_1 M I}{\sqrt{l^2 + 4R^2}} \cos \omega t = E_{\max} \cos \omega t.$$

En résumé :

*Par le mouvement uniforme de rotation d'un aimant à l'intérieur d'une bobine, il se produit aux extrémités de la bobine une force électromotrice alternative dont la valeur efficace dépend du moment magnétique de l'aimant et des constantes de la bobine.*

Ce problème élémentaire résolu, supposons une deuxième bobine dont l'axe toujours normal à l'axe de rotation de l'aimant ne soit plus normal à la verticale  $Oz$  et fasse un angle  $\alpha$  avec l'axe de la première.

En répétant la même série de calculs que précédemment on trouverait pour la force électromotrice animant cette seconde bobine

$$e' = E_{\max} \cos(\omega t + \alpha).$$

Le courant correspondant sera donc encore sinusoïdal mais décalé d'un angle  $\alpha$  par rapport au premier.

Si  $\alpha = 90^\circ$ , on aura donc des forces électromotrices diphasées; de même au moyen de trois bobines dont les axes font entre eux des angles de  $60^\circ$  on obtiendrait des courants triphasés.

On pourrait utiliser ce dispositif simple pour la génération des courants polyphasés; d'ailleurs, la modification industrielle actuellement employée n'en est qu'une modification.

En effet :

1° *Deux bobines ou système de barres diamétralement opposées dans le stator ou bobinage fixe constituent deux bobines fixes ayant pour centre commun le centre de rotation de l'aimant formé par les pôles N et S également diamétralement opposés dans le fer tournant;*

2° *Le fer tournant peut être assimilé à un système d'aimants agissant en même temps et de la même façon sur toutes les bobines sériées d'un même groupe.*

En conséquence, si le fer tournant possède  $p$  paires de pôles, la force électromotrice relative à l'un des circuits distincts du bobinage fixe sera de la forme

$$E_1 = p E_{\max} \cos \omega t,$$

celle correspondant à un autre circuit sera de même

$$E_2 = p E_{\max} \cos(\omega t + \alpha);$$

ce sont des forces électromotrices polyphasées.

On conçoit donc, d'après cette théorie élémentaire, la possibilité d'introduire le calcul dans le mécanisme, somme toute compliqué, des alternateurs polyphasés modernes.

#### IV. — Moteurs polyphasés.

Nous n'exposerons que la théorie du moteur asynchrone; c'est d'ailleurs le seul réellement utilisé dans l'industrie (1).

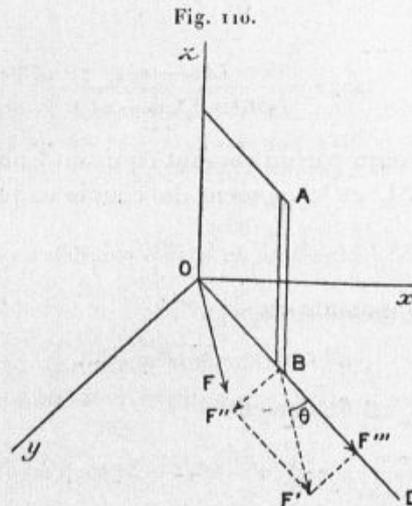
---

(1) La théorie complète peut se faire par la considération des ondes magnétiques traversant deux fois l'entrefer et les moteurs polyphasés se classer d'après les ondes utilisées.

*Moteur asynchrone à champ tournant.* — Le problème théorique à résoudre est le suivant :

*Un cadre dont l'enroulement est fermé sur lui-même se meut autour d'une droite normale au champ tournant ou axe du champ, trouver le moment du couple auquel il est soumis.*

Soient  $Oz$  l'axe du champ et, par suite, l'axe de rotation,  $OD$  la trace du circuit fermé (rectangle constitué par deux barres opposées



Action d'un champ tournant sur un cadre mobile.

de la cage d'écurueil),  $OF$  la direction du champ d'intensité  $\mathcal{H}$  (fig. 110).

Comptons les angles de rotation à partir de  $Ox$ , soient

$$\begin{aligned} \overline{xOD} &= \omega' t, \\ \overline{xOF} &= \omega t + \mathcal{S}. \end{aligned}$$

On aura pour la composante normale du champ

$$\mathcal{H} \sin[(\omega - \omega') t + \mathcal{S}],$$

et, par suite, le flux de force sera

$$\Phi = \mathcal{H} S \sin[(\omega - \omega') t + \mathcal{S}];$$

on en déduit

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \mathcal{H} S (\omega - \omega') \cos(\omega - \omega') t + \mathcal{S}].$$

Nous obtiendrons l'intensité du courant parcourant le circuit mobile en appliquant à ce circuit l'équation fondamentale de l'induction, ce qui nous fournit

$$-Ri = L \frac{di}{dt} + \mathcal{JCS}(\omega - \omega') \cos[(\omega - \omega')t + \mathfrak{S}],$$

d'où l'on tire

$$i = \frac{S\mathcal{J}C(\omega - \omega')}{\sqrt{R^2 + L^2(\omega - \omega')^2}} \cos[(\omega - \omega')t + \mathfrak{S} - \alpha],$$

avec la condition

$$(3) \quad \tan \alpha = \frac{L(\omega - \omega')}{\sqrt{R^2 + L^2(\omega - \omega')^2}}.$$

Or le cadre parcouru par un courant équivaut à un feuillet magnétique de moment  $Si$ , et le moment du couple auquel il est soumis sera

$$M^i = Si \times \text{composante du champ parallèle au cadre}$$

et comme cette composante est

$$\mathcal{J}C \cos[(\omega - \omega')t + \mathfrak{S}],$$

le moment cherché est finalement

$$M^i = \frac{S^2 \mathcal{J}C^2 (\omega - \omega')}{\sqrt{R^2 + L^2 (\omega - \omega')^2}} \cos[(\omega - \omega')t + \mathfrak{S}] \cos[(\omega - \omega')t + \mathfrak{S} - \alpha].$$

Pour obtenir le couple moteur moyen  $C$ , écrivons que le travail de ce couple moyen est égal à la somme des travaux des couples élémentaires; ce qui donne la relation

$$C \times 2\pi = \int_0^T M^i(\omega - \omega') dt;$$

c'est-à-dire

$$C = \frac{S^2 \mathcal{J}C^2 (\omega - \omega')^2}{\sqrt{R^2 + L^2 (\omega - \omega')^2}} \times \frac{1}{2\pi} \int_0^T \cos[(\omega - \omega')t + \mathfrak{S}] \cos[(\omega - \omega')t + \mathfrak{S} - \alpha] dt;$$

or, l'intégrale désignée a pour valeur

$$\frac{2\pi \cos \alpha}{2(\omega - \omega')}.$$

En définitive le *couple moteur moyen* aura pour valeur

$$C_1 = \frac{S^2 \mathcal{J} \mathcal{C}^2 (\omega - \omega') \cos \alpha}{2 \sqrt{R^2 + L^2 (\omega - \omega')^2}},$$

On peut encore l'écrire sous la forme

$$(a) \quad C_1 = \frac{S^2 \mathcal{J} \mathcal{C}^2 (\omega - \omega') R}{2 [R^2 + L^2 (\omega - \omega')^2]},$$

obtenue en remplaçant  $\cos \alpha$  par sa valeur tirée de l'égalité (3).

*Application à la cage d'écurie.* — Soit  $m$  le nombre des cadres tournants constitués par les barres prises deux à deux,  $L_1$  la nouvelle valeur du coefficient de self-induction, on aura sensiblement pour le couple moteur du rotor asynchrone

$$C = \frac{m R (\omega - \omega') S^2 \mathcal{J} \mathcal{C}^2}{2 [R^2 + L_1^2 (\omega - \omega')^2]},$$

on obtient sa valeur au démarrage en faisant dans l'expression précédente  $\omega' = 0$ , ce qui donne

$$C_{\text{origine}} = \frac{m R \omega S^2 \mathcal{J} \mathcal{C}^2}{2 (R^2 + L_1^2 \omega^2)}.$$

Or, dans la pratique, la résistance est notablement inférieure à l'inductance, ce qui revient à dire que le dénominateur de la fraction précédente est sensiblement égal à  $2 L_1^2 \omega^2$ ; dans ces conditions, le couple au démarrage croît avec la résistance du circuit, ce qui nous explique à nouveau l'emploi des rhéostats de démarrage et du dispositif Boucherot (*voir* p. 75).

Faisons remarquer que le couple moteur  $C$  s'annule pour  $\omega = \omega'$ , résultat évident, car, dans ce cas, la variation du flux coupé est nulle, et aucun courant ne circule dans l'appareil mobile.

Le moteur à champ tournant constant est donc forcément asynchrone.

Étudions un pareil moteur en marche; il développe par seconde une quantité de travail, ou possède une puissance moyenne extérieure  $P$  que l'on obtiendra en multipliant le couple moteur par la vitesse angulaire

$$P = C \omega'.$$

D'autre part, l'effet Joule produit dans les spires du rotor ho-

M.

biné sans bagues ou dans les barres de la cage d'écuréuil des effets caloriques, dont la valeur mécanique est

$$P' = RI_{\text{eff}}^2,$$

or

$$I_{\text{eff}} = \frac{S\mathcal{C}(\omega - \omega')}{\sqrt{2} \sqrt{R^2 + L^2(\omega - \omega')^2}},$$

par suite, on obtient

$$P' = \frac{RS^2\mathcal{C}^2(\omega - \omega')^2}{2[R^2 + L^2(\omega - \omega')^2]} = C(\omega - \omega')$$

La puissance totale développée sera donc

$$P + P' = C\omega,$$

et, par suite, le rendement  $\mathcal{R}^d$  du moteur asynchrone devient

$$\mathcal{R}^d = \frac{\omega'}{\omega}.$$

On voit qu'il sera d'autant plus grand que les vitesses de rotation seront plus voisines.

Toutes les conclusions précédentes ont été obtenues par la considération de l'égalité

$$-RI = L \frac{\partial I}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial t},$$

appliquée à un seul cadre; or, il est évident que, dans la cage d'écuréuil notamment, le cadre constitué par deux barres diamétralement opposées est soumis, en outre, aux actions inductives des autres cadres.

Si l'on désigne par  $M_n^{n'}$  le coefficient de mutuelle induction des cadres de rangs  $n$  et  $n'$ , par  $R_n, L_n, \Phi_n, I_n$  la résistance, le coefficient de self-induction et le flux extérieur et l'intensité correspondant au cadre de rang  $n$ , on aura  $n$  équations de la forme (A)

$$(A) \quad -R_n I_n = L_n \frac{\partial I_n}{\partial t} + \sum M_n^{n'} \frac{\partial I_{n'}}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_n}{\partial t},$$

dans lesquelles les inconnues sont les intensités des courants parcourant les divers circuits mobiles.

Connaissant ces intensités on trouverait comme précédemment le couple moteur.

Enfin, on retrouverait identiquement tous les résultats précédents en imaginant :

- 1° Le champ inducteur fixe en grandeur et en direction ;
- 2° Le cadre mobile animé d'une vitesse de rotation  $\omega - \omega'$ .

Mais il est facile de voir que le véritable champ actif produisant la rotation est dirigé normalement aux barres mobiles, c'est-à-dire *radial*.

En effet, reportons-nous à la figure *h'* dans laquelle AB représente l'élément mobile ; en un point quelconque B par exemple de cette barre le champ parallèle à OF peut se décomposer en deux autres dont l'un  $\mathfrak{H} \cos \theta$ , dirigé suivant OB, aura seul pour effet, et ce, d'après la loi fondamentale de Laplace, de provoquer la rotation de la barre.

Or, ce champ radial est essentiellement variable avec le temps, sa valeur, à un instant donné, étant

$$\mathfrak{H} \cos [(\omega - \omega')t + \mathfrak{Z}],$$

sa période

$$T = \frac{2\pi}{\omega' - \omega};$$

elle est très grande puisque  $\omega'$  diffère de  $\omega$ .

En définitive, nous pouvons conclure en disant :

*Le champ actif agissant sur le rotor d'un moteur asynchrone est une fonction sinusoïdale du temps, il est radial, c'est-à-dire normal à l'axe de rotation, et ses maxima se déplacent angulairement d'une quantité constamment pour une période des courants excitateurs.*

La considération du champ radial peut d'ailleurs être prévue par l'existence des lignes de force émancées des bobines correspondant aux diverses phases du stator.

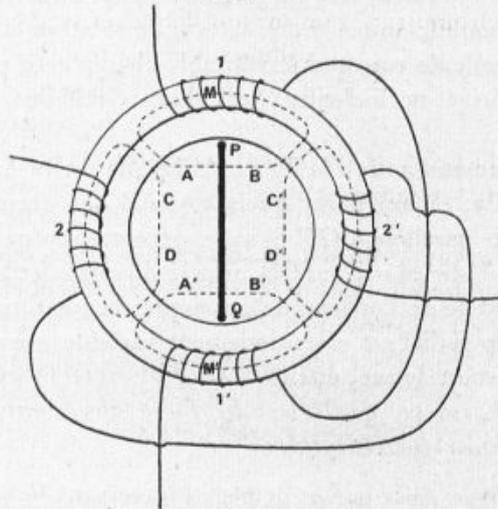
Nous indiquons (*fig. 111r*) le schéma des lignes de force dans un moteur asynchrone biphasé ; ces lignes sont dans l'entrefer sensiblement normales à l'axe de rotation.

Mais, en réalité, il se produit entre l'inducteur et l'induit des pertes magnétiques dont il faudrait tenir compte ; de même le champ tournant peut réagir sur l'inducteur et y provoquer une variation dans l'intensité efficace des courants qui le parcourent.

Ces diverses causes provoqueront donc des variations dans la

valeur du couple moteur, variations étudiées en détail et par Po-

Fig. 111.



Lignes de force dans un moteur biphasé.

tier <sup>(1)</sup> et par M. Blondel <sup>(2)</sup>. On peut les négliger dans l'approximation élémentaire que nous avons donnée.

#### V. — Théorie des transformateurs homomorphiques et polymorphiques.

TRANSFORMATIONS HOMOMORPHIQUES. — On peut prendre deux procédés, l'un basé sur les considérations des coefficients d'induction, l'autre sur l'hypothèse du flux intégral.

1° *Théorie du transformateur par les coefficients d'induction.* — Supposons le primaire et le secondaire enroulés sur un même anneau en forme de tore (*fig. 71*), ce qui revient à leur donner la même longueur, et soient :

$L_1$  le coefficient de self-induction du primaire,  
 $L_2$  » » du secondaire,

<sup>(1)</sup> H. POTIER, *Journal de Physique*, 3<sup>e</sup> série, t. VI, 1897, p. 341 et 483.

<sup>(2)</sup> BLONDEL, *Lumière électrique*, t. LI, p. 320.

M le coefficient de mutuelle induction des deux circuits,  
 $N_1$  le nombre total des spires du primaire,  
 $N_2$  » » du secondaire,  
 $e_1$  la force électromotrice à un instant donné au primaire,  
 $E_1$  » » maximum du primaire,  
 $e_2$  » » à un instant donné au secondaire,  
 $E_2$  » » » du secondaire,  
 $i_1$  le courant du primaire traversant la résistance correspondante  $R_1$ ,  
 $i_2$  » du secondaire » » »  $R_2$ .

Deux cas peuvent se présenter suivant que le secondaire sera en circuit ouvert ou fermé; considérons d'abord le premier cas.

La question est la suivante :

*Le primaire étant soumis à une force électromotrice sinusoïdale  $e_1 = E_1 \sin \omega t$ , quelle est la force électromotrice  $e_2$  produite aux bornes du secondaire?*

Or, tout le flux émis par le primaire traversant le secondaire, la force électromotrice cherchée sera

$$e_2 = M \frac{\partial i_1}{\partial t}.$$

Mais le courant du primaire nous est fourni par la relation

$$(1) \quad E_1 \sin \omega t - R_1 i_1 = L_1 \frac{\partial i_1}{\partial t},$$

d'où l'on déduit

$$(2) \quad i_1 = \frac{E_1}{\sqrt{R_1^2 + L_1^2 \omega^2}} \sin(\omega t - \varphi_1),$$

$\varphi_1$  étant le décalage entre le courant et la force électromotrice.

On en déduit

$$(3) \quad e_2 = M \frac{\partial i_1}{\partial t} = \frac{M E_1 \omega}{\sqrt{R_1^2 + L_1^2 \omega^2}} \cos(\omega t - \varphi_1),$$

de telle sorte que la valeur maximum de la force électromotrice au secondaire sera

$$(3') \quad E_2 = \frac{M E_1 \omega}{\sqrt{R_1^2 + L_1^2 \omega^2}}.$$

Il est possible de transformer cette expression en admettant les relations connues sur les coefficients d'induction, qui nous permettent d'écrire

$$\begin{aligned}L_1 &= KN_1^2, \\L_2 &= KN_2^2, \\M &= KN_1N_2.\end{aligned}$$

Négligeant, de plus, la résistance ohmique  $R_1$ , on obtient

$$(3'') \quad E_2 = \frac{KN_1N_2E_1\omega}{KN_1^2\omega} = E_1 \frac{N_2}{N_1},$$

c'est-à-dire que :

*La force électromotrice maximum du secondaire est égale à celle du primaire multipliée par le rapport de transformation*

$$\frac{N_2}{N_1}.$$

On conçoit alors le rôle de tout transformateur comme nous l'avons indiqué p. 81.

De même, par les considérations des formules (1) et (2) précédentes, on voit qu'il y a un décalage de  $\varphi_1$ , tel que  $\tan \varphi_1 = \frac{L_1\omega}{R_1}$  entre l'intensité et la force électromotrice au primaire, et que la force électromotrice au secondaire est elle-même décalée de  $\frac{1}{4}$  de période relativement au primaire.

Ceci nous explique que Ferraris, dans ses premières expériences, ait pu obtenir un champ tournant avec les courants décalés que lui fournissaient le primaire et le secondaire d'un transformateur Gaulard.

Faisons enfin remarquer que la grande perméabilité du fer sur lequel se trouvent enroulés les deux circuits a pour effet d'augmenter les valeurs numériques des coefficients d'induction précédemment employés.

Les conclusions ainsi obtenues ne sont exactes rigoureusement que si le secondaire n'est pas fermé, car, aussitôt que le courant secondaire existe, il réagit sur le circuit primaire, et l'équation (1) devient inexacte.

On doit la remplacer par le système suivant :

$$(a) \quad \begin{cases} E_1 \sin \omega t - R_1 i_1 = L_1 \frac{\partial i_1}{\partial t} + M \frac{\partial i_2}{\partial t} \\ - R_2 i_2 = L_2 \frac{\partial i_2}{\partial t} + M \frac{\partial i_1}{\partial t}, \end{cases}$$

dont l'intégration nous fournira les intensités  $i_1$  et  $i_2$ .

2° *Théorie du transformateur par le flux intégral.* — Le système formé pour le primaire et le secondaire enroulés sur le même anneau métallique constitue, en réalité, un *circuit magnétique fermé*, auquel nous pouvons appliquer les équations fondamentales caractéristiques

$$(b) \quad \begin{cases} (1) & e_1 - R_1 i_1 = N_1 \frac{\partial \Phi}{\partial t}, \\ (2) & 0 - R_2 i_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt}, \\ (3) & \mathfrak{R} \Phi = 4\pi N_1 i_1 + 4\pi N_2 i_2, \end{cases}$$

où  $\mathfrak{R}$  est la réluctance du circuit et  $\Phi$  le flux commun sinusoïdal donné par la relation

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin \omega t.$$

On en déduit

$$i_2 = -\frac{N_2}{R_2} \Phi_{\max} \omega \cos \omega t = \frac{N_2 \omega \Phi_{\max}}{R_2} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right),$$

ce qui nous indique un décalage de  $90^\circ$  du courant secondaire.

On trouvera facilement  $i_1$  par l'équation (3) du système (b) qui fournit

$$i_1 = \frac{\mathfrak{R} \Phi_{\max} \sin \omega t}{4\pi N_1} + \frac{N_2^2 \omega \Phi_{\max} \cos \omega t}{N_1 R_2}.$$

Cette expression de  $i_1$  se présente sous la forme

$$i_1 = A \sin \omega t + B \cos \omega t$$

avec

$$A = \frac{\mathfrak{R} \Phi_{\max}}{4\pi N_1},$$

$$B = \frac{N_2^2 \omega \Phi_{\max}}{N_1 R_2}.$$

On peut l'écrire :

$$i_1 = \sqrt{A^2 + B^2} \left( \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}} \sin \omega t + \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}} \cos \omega t \right),$$

ou, plus simplement,

$$i_1 = \sqrt{A^2 + B^2} \sin(\omega t + \varphi),$$

avec la condition

$$\operatorname{tang} \varphi = \frac{B}{A}.$$

Sous cette dernière forme, on voit que le maximum de  $i_1$  sera donné par

$$(i_1)_m = \Phi_{\max}^2 \left( \frac{\mathcal{R}^2}{16 \pi^2 N_1^2} + \frac{N_2^2 \omega^2}{N_1^2 R_2^2} \right).$$

D'autre part,

$$(i_2)_m = \frac{N_2^2 \omega^2 \Phi_{\max}^2}{R_2^2}.$$

Divisons membre à membre ces deux dernières égalités, il vient

$$(4) \quad \left( \frac{i_{2m}}{i_{1m}} \right)^2 = \frac{N_2^2 \omega^2}{R_2^2} \frac{16 \pi^2 N_1^2 R_2^2}{\mathcal{R}^2 R_2^2 + 16 \pi^2 N_1^2 \omega^2}.$$

Or, négligeons le terme  $\mathcal{R}^2 R_2^2$ ,

$$\left( \frac{i_{2m}}{i_{1m}} \right)^2 = \frac{N_2^2}{N_1^2},$$

c'est-à-dire, finalement,

$$\frac{i_{2m}}{i_{1m}} = \frac{N_2}{N_1}.$$

Cette relation existe évidemment aussi entre les intensités efficaces et les forces électromotrices correspondantes.

On obtient donc, au moyen des relations du système (b), les valeurs exactes des intensités au primaire et au secondaire.

Supprimons dans l'égalité (1) de ce système le terme  $R_1 i_1$ , on obtiendra

$$(c) \quad \begin{cases} e_1 = N_1 \frac{\partial \Phi}{\partial t}, \\ -R_2 i_2 = N_2 \frac{\partial \Phi}{\partial t}, \end{cases}$$

d'où l'on déduit, par simple diversion,

$$\frac{e_1}{-R_2 i_2} = \frac{N_1}{N_2},$$

c'est-à-dire

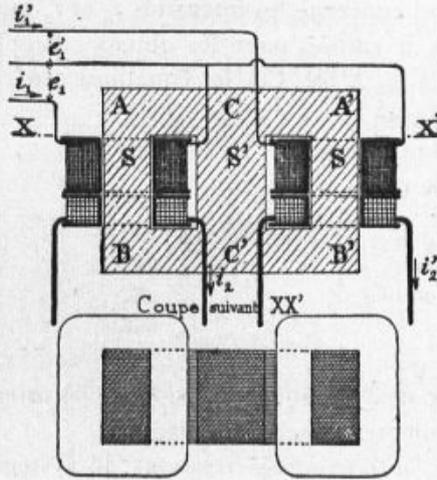
$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2},$$

formule fondamentale des transformateurs.

On voit, par ces diverses considérations, que cette formule n'est qu'approchée, et que, notamment, elle exige la conservation intégrale du flux, condition qui est rarement réalisée par suite des dérivations magnétiques.

CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES SUR LES TRANSFORMATEURS BIPHASÉS. — Un transformateur biphasé est, le plus souvent, constitué comme l'indique la figure schématique suivante (fig. 112).

Fig. 112.



Transformateur biphasé avec fil unique de retour.

La considération des flux de force nous conduit à des résultats intéressants.

Tout d'abord, le flux de force correspondant à la barre AB peut se représenter par

$$\Phi_1 = \Phi_{\max} \sin \omega t;$$

celui relatif à A'B', par

$$\Phi_2 = - \Phi_{\max} \cos \omega t,$$

puisque les deux courants produisant ces flux sont décalés de  $\frac{\pi}{2}$  et que les deux primaires, ainsi que les deux secondaires, sont identiques.

Ces deux flux se ferment suivant le noyau commun  $CC'$  dans lequel ils s'additionnent et prennent la valeur

$$\Phi_3 = \Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_{\max}(\sin \omega t - \cos \omega t),$$

c'est-à-dire

$$\Phi_3 = \Phi_{\max} \sqrt{2} \sin(\omega t - 45^\circ).$$

La valeur maximum étant  $\Phi_{\max} \sqrt{2}$ , il s'ensuit que, si l'on veut conserver à l'induction magnétique une valeur constante, il faudra faire en sorte que la section de la branche commune  $CC'$  soit  $\sqrt{2}$  fois plus grande que celle des barres  $AB, A'B'$ .

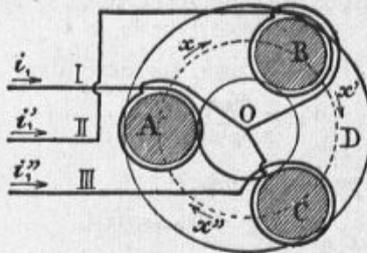
Enfin, en ce qui concerne les intensités  $i_2$  et  $i'_2$  que produisent les deux secondaires, il suffira, pour les obtenir, d'appliquer à chacun des circuits  $ABC'CA, A'B'C'CA'$  les équations générales des circuits magnétiques.

Nous obtenons notamment :

$$\begin{array}{l} 1^\circ \text{ Circuit } ABC'CA. \\ 2^\circ \text{ Circuit } A'B'C'CA'. \end{array} \left\{ \begin{array}{l} e_1 - R_1 i_1 = N_1 \frac{\partial \Phi_1}{\partial t} \\ -R_2 i_2 = N_2 \frac{\partial \Phi_1}{\partial t} \\ e'_1 - R_1 i'_1 = N_1 \frac{\partial \Phi'_2}{\partial t} \\ -R_2 i'_2 = N_2 \frac{\partial \Phi'_2}{\partial t}. \end{array} \right.$$

CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES SUR LES TRANSFORMATEURS TRIPHASÉS.  
— Nous examinerons le cas de trois transformateurs montés en

Fig. 113.



Coupe d'un transformateur triphasé monté en étoile.

étoile, constitués par trois noyaux verticaux représentés en coupe (fig. 113).

Les barres A, B, C forment ainsi un prisme triangulaire dont les arêtes seraient réunies par deux culasses circulaires.

Il y a de cette façon trois circuits magnétiques constitués par les barres prises deux à deux et les parties terminales des communications; on peut encore dire que les flux de force émanés de deux des circuits se fermeront par le troisième.

Or ces flux peuvent se représenter :

$$\begin{aligned} \text{Pour la barre A, par.....} & \Phi_1 = \Phi_{\max} \sin \omega t; \\ \text{Pour la barre B, par.....} & \Phi_2 = \Phi_{\max} \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right); \\ \text{Pour la barre C, par.....} & \Phi_3 = \Phi_{\max} \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right). \end{aligned}$$

D'ailleurs les flux de force s'additionnant algébriquement, on voit facilement que, si l'on désigne par  $x$ ,  $x'$ ,  $x''$  les flux correspondant aux portions de couronne AB, BC, CA, on aura

$$\begin{aligned} (1) \quad & x = \Phi_1 + x'', \\ (2) \quad & x' = \Phi_2 + x, \\ (3) \quad & x'' = \Phi_3 + x'. \end{aligned}$$

Or la somme des trois flux  $x + x' + x''$  est nulle en vertu de l'égalité fondamentale du circuit magnétique.

On aura donc, en retranchant les égalités (1) et (2), la relation

$$x - x' = \Phi_1 - \Phi_2 + x'' - x,$$

que l'on peut écrire

$$2x = \Phi_1 - \Phi_2 - x' + x'';$$

et en ajoutant  $x$  de part et d'autre, on obtient

$$3x = \Phi_1 - \Phi_2.$$

Finalement

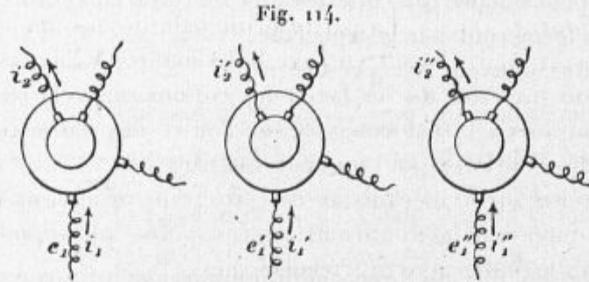
$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{3}(\Phi_1 - \Phi_2) = \frac{\Phi_{\max}}{3} \left[ \sin \omega t - \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ &= \frac{\Phi_{\max} \sqrt{3}}{3} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{6} \right). \end{aligned}$$

On aurait de même  $x'$  et  $x''$ .

On voit donc que le flux dans les parties terminales est en décalage sur le flux des noyaux, et que sa valeur maximum est  $\frac{\sqrt{3}}{3}$  ou 0,577 fois la valeur maximum du flux des noyaux.

En conséquence, la section de la partie terminale devra avoir une surface égale à 0,577 fois celle de la section des noyaux, si l'on veut donner au système une induction magnétique constante.

Enfin, et comme nous l'avons vu dans nos considérations élémen-



taires, on peut se servir de trois transformateurs distincts, comme nous l'indiquons figure 114.

Les équations fondamentales du système seront alors :

1° Pour le transformateur (1)

$$\begin{aligned} e_1 - R_1 i_1 &= N_1 \frac{\partial \Phi_1}{\partial t}, \\ -R_2 i_2 &= N_2 \frac{\partial \Phi_1}{\partial t}; \end{aligned}$$

2° Pour le transformateur (2)

$$\begin{aligned} e_1' - R_1 i_1' &= N_1 \frac{\partial \Phi_1}{\partial t}, \\ -R_2 i_2' &= N_2 \frac{\partial \Phi_2}{\partial t}; \end{aligned}$$

3° Pour le transformateur (3)

$$\begin{aligned} e_1'' - R_1 i_1'' &= N_1 \frac{\partial \Phi_3}{\partial t}, \\ -R_2 i_2'' &= N_2 \frac{\partial \Phi_3}{\partial t}. \end{aligned}$$

On convient d'appeler forces électromotrices ou tensions aux secondaires les quantités  $R_2 i_2$ ,  $R_2 i_2'$ ,  $R_2 i_2''$ .

On voit facilement que ces tensions sont décalées d'une demi-période par rapport aux quantités correspondantes du primaire et que de plus elles sont multipliées par le rapport  $\frac{N_2}{N_1}$ .

NOTIONS THÉORIQUES SUR LES TRANSFORMATEURS POLYMORPHIQUES.  
 — En laissant de côté la classe des moteurs dynamo que nous avons décrite page 94, Chapitre V, nous n'examinerons que les commutateurs, les convertisseurs rotatifs ainsi que le transformateur Scott.

1° *Commutateurs.* — La partie principale de ces appareils consiste, ainsi que nous l'avons vu page 89, Chapitre V, dans un induit mobile muni sur l'une de ses faces des connexions relatives au système de courants à transformer, et sur l'autre des connexions aptes à recevoir les courants que l'on veut obtenir.

Sans revenir sur le mécanisme de cette transformation, il y a lieu de se demander comment varient les constantes physiques, notamment le voltage des courants transformés.

Considérons d'abord le cas de la transformation *alternatif continu*; l'appareil mobile comprendra sur l'une de ses faces un collecteur, sur l'autre deux bagues isolées. Or, nous avons vu, page 136, que la différence de potentiel entre ces deux bagues nous était donnée par l'expression relative à deux points diamétralement opposés dans l'induit

$$V_1 - V_2 = 2k \sin \theta.$$

Dans cette formule, la constante se déterminera en l'appliquant aux deux balais du collecteur, car la différence  $V_1 - V_2$  est alors égale à la force électromotrice  $E$  de la machine en continu; il vient donc

$$E = 2k, \quad \text{d'où} \quad k = \frac{E}{2},$$

et, par suite,

$$V_1 - V_2 = E \sin \omega t.$$

En conséquence, la force électromotrice efficace du courant alternatif sera  $\frac{E}{\sqrt{2}}$  ou 0,707 fois celle du continu : le voltage se trouvera diminué si l'on transforme un courant continu en alternatif, augmenté dans le cas contraire; il est d'ailleurs évident qu'il en sera de même dans une transformation de continus en biphasés à quatre bagues isolées.

Examinons enfin le cas très souvent employé dans la pratique de la transformation réciproque des courants continus et triphasés.

Soit (*fig. 115*) le schéma employé.

Nous avons établi qu'entre deux quelconques des balais triphasés la différence de potentiel était de la forme

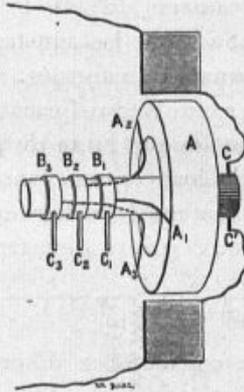
$$\Delta V = -k\sqrt{3} \sin(\omega t + \varepsilon),$$

et comme nous venons de l'établir  $k = \frac{E}{2}$ , de telle sorte que

$$\Delta V = -\frac{E\sqrt{3}}{2} \sin(\omega t - \varepsilon),$$

formule nous indiquant que la force électromotrice  $E'_{\text{eff}}$  est égale

Fig. 115.



à  $\frac{E\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}$ . Dans ce cas, la transformation du voltage se fait suivant l'égalité

$$\frac{E'}{E} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} = 0,612.$$

Ainsi donc une différence de potentiel de 100 volts aux balais du collecteur produira entre deux des balais triphasés une force électromotrice efficace de 61,2 volts.

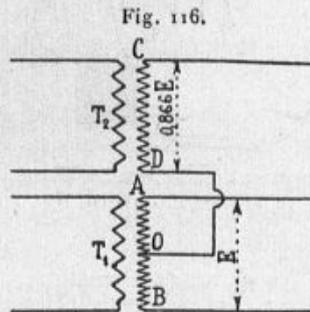
Il y a enfin lieu de signaler que, dans le cas de la transformation des triphasés en continus, le convertisseur fonctionne alors comme moteur synchrone, et que, par suite, le nombre de tours de l'induit mobile ne dépend que de la fréquence de ces courants et non de leur voltage efficace. On verrait de même que la transformation biphasé-triphasée élève ou abaisse le voltage suivant le rapport  $\frac{707}{612}$  ou le rapport inverse.

2° *Convertisseurs rotatifs.* — Dans ces appareils, un même anneau porte deux enroulements distincts, ce qui les distingue des commutatrices.

Le primaire est alimenté par les courants dont il s'agit de transformer la puissance, et dans le cas des courants polyphasés, cette puissance est constante, étant de la forme  $\sum E_{eff} I_{eff} \cos \varphi$ ; elle est en partie restituée au secondaire que l'on divise en un nombre de sections variables avec la nature des courants à obtenir. En fait, l'anneau mobile du convertisseur rotatif peut être considéré comme l'inducteur du moteur asynchrone constitué par l'appareil.

3° *Transformateur Scott.* — Cet appareil, décrit page 92, Chapitre IV, a pour but de transformer les courants triphasés en biphasés, ou réciproquement.

La théorie complète ne saurait se faire que par les équations du circuit magnétique; nous nous contenterons de démontrer, reprenant le schéma suivant (fig. 116), que les différences de potentiel  $V_A - V_B$ ,



$V_A - V_C$ ,  $V_B - V_C$  sont triphasées quand les primaires  $T_1$  et  $T_2$  sont animés par des courants biphasés.

On peut en effet écrire, en désignant par  $n$  le nombre des spires du secondaire AB, par  $n'$  celui du secondaire CD, les égalités suivantes :

$$V_A - V_B = kn \sin \omega t,$$

$$V_A - V_0 = V_0 - V_B = \frac{kn}{2} \sin \omega t,$$

$$V_C - V_0 = -n'k \cos \omega t.$$

On en déduit

$$V_A - V_C = k \frac{n}{2} \sin \omega t + kn' \cos \omega t.$$

Or, on a vu page 93 que  $n' = \frac{n\sqrt{3}}{2}$ ; en conséquence, on en déduit

$$(1) \quad V_A - V_C = kn \left( \frac{1}{2} \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t \right) = kn \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{3} \right).$$

On aura de même

$$(2) \quad V_C - V_B = kn \left( \frac{1}{2} \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t \right) = kn \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{3} \right).$$

Enfin remarquons que l'on peut écrire

$$V_A - V_B = kn \sin \omega t = -kn \sin \left( \omega t + \frac{3\pi}{3} \right),$$

d'où l'égalité

$$(3) \quad V_B - V_A = kn \sin \left( \omega t + \frac{3\pi}{3} \right).$$

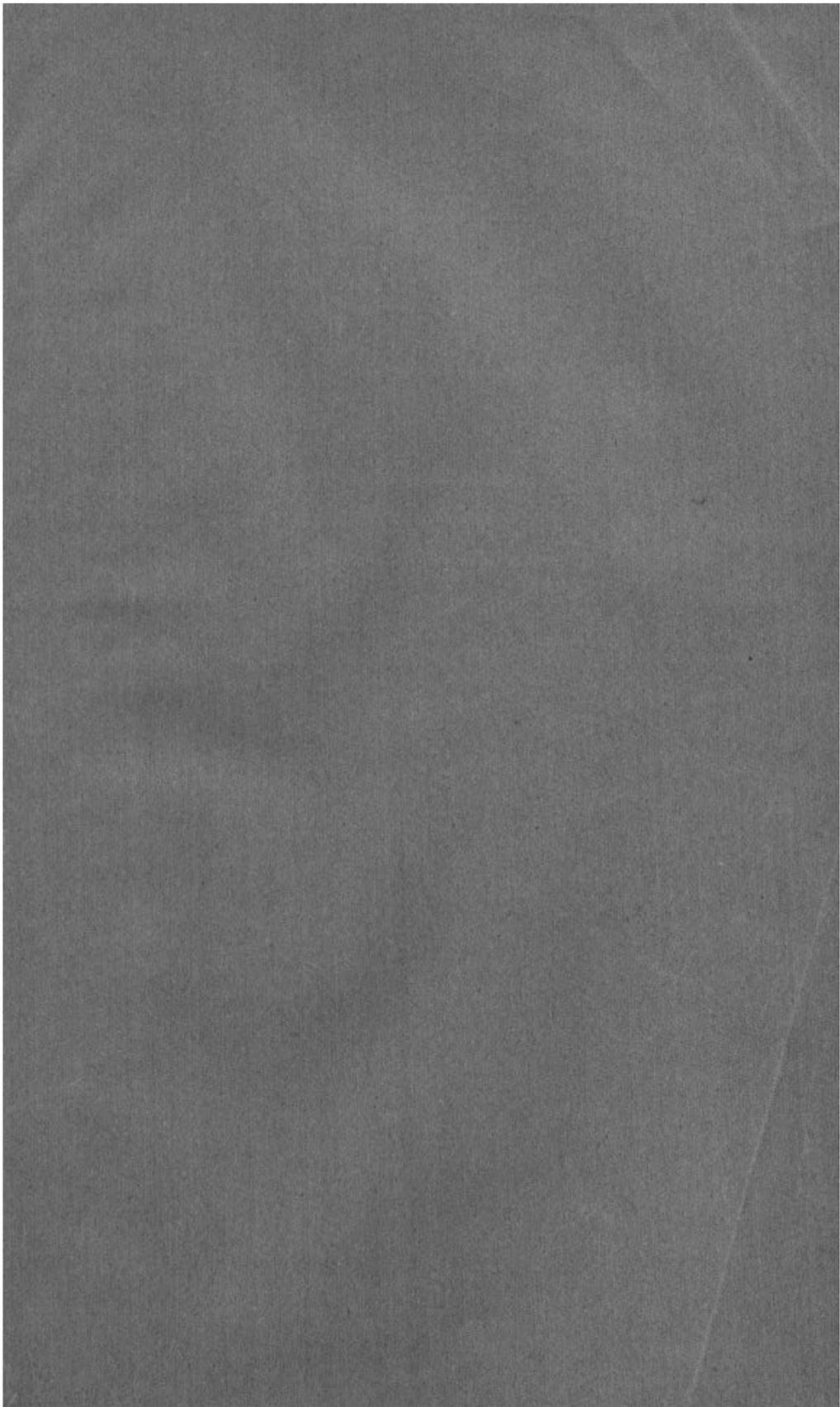
On a donc le système suivant :

$$(x) \quad \begin{cases} V_C - V_B = kn \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{3} \right), \\ V_A - V_C = kn \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{3} \right), \\ V_B - V_A = kn \sin \left( \omega t + \frac{3\pi}{3} \right). \end{cases}$$

Ces égalités nous montrent nettement qu'entre deux des bornes A, B, C, il existe des forces électromotrices triphasées.

Nous limiterons ici les données théoriques, qui nous ont paru indispensables pour l'explication semi-rigoureuse de la grande question que nous avons été appelé à traiter.





---

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS,  
34479 Quai des Grands-Augustins, 55.

---