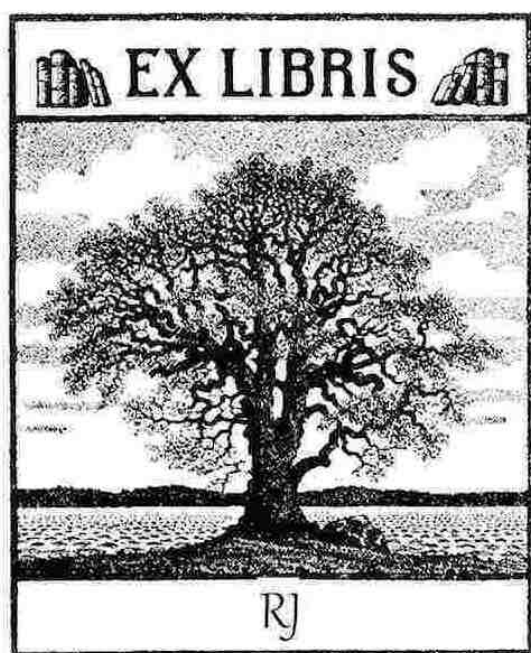


ALFRED
SOULIER

LES COURANTS ALTERNATIFS



GARNIER FRÈRES PARIS



Numérisé en Juillet 2025 par F1CJL , 300dpi

LES COURANTS ALTERNATIFS

OUVRAGES DU MÊME AUTEUR :

Traité pratique d'électricité. — 144^e mille. — Sonneries, téléphones, éclairage, rayons X, télégraphie sans fil, dictionnaire des mots techniques. 1 volume in-16, illustré, broché.

Installations électriques. — 125^e mille. — Outillage, appareillage, canalisations, mesures électriques, transformateurs, etc. 1 volume in-16, illustré, broché.

Manuel de l'électricien. — 88^e mille. — Machines dynamos-électriques, construction, installation, entretien, dérangements. 1 volume in-16, illustré, broché.

Les moteurs électriques. — 100^e mille. — Moteurs à courant continu, moteurs à courant alternatif, mise en marche, traction électrique, montage, bobinage, réparations, entretien, adaptation des moteurs aux machines-outils, etc. 1 vol. in-16, illustré, broché.

Les applications industrielles de l'électricité. — 50^e mille. — Éclairage, transmission de la force à distance, tramways et chemin de fer électriques, électrochimie, etc. 1 vol. in-16, illustré, broché.

Le courant continu. — 50^e mille. — Le courant électrique, les piles hydro-électriques, les aimants, circuit magnétique, etc. 1 volume in-16, illustré, broché.

Les courants alternatifs. — 46^e mille. — Notions fondamentales, calculs des appareils à courants alternatifs, courants alternatifs polyphasés; etc. 1 vol. in-16, illustré, broché.

Les accumulateurs électriques. — 25^e mille. — Comment ils sont faits comment on les recharge, comment on les entretient. 1 volume in-16, illustré, broché.

Traité de galvanoplastie. — 27^e mille. — Chromage, cuivrage, niquelage, argenture, dorure, reproduction des objets, moulages, recettes pratiques, etc. 1 volume in-16, illustré, broché.

Recueil de plans de pose et schémas d'électricité industrielle. — 40^e mille. — Sonneries, téléphones, lumière, minuterie, dynamos et moteurs à courant continu, alternateurs, transformateurs, commande à distance des moteurs, etc. 1 volume in-8^o oblong, cartonné.

L'électricité sans algèbre. — 34^e mille. — Cours complet et pratique accessible à tout le monde. 1 vol. in-16, illustré, relié.

Manipulations d'électricité. — 11^e mille. — Recueil d'expériences faciles à réaliser concernant le courant continu et les courants alternatifs, etc. 1 vol. in-16, illustré cartonné.

Formulaire pratique d'électricité. — Recueil de données et de règles techniques concernant les installations électriques et les conditions d'utilisation du matériel courant. 1 volume in-16, illustré.

ALFRED SOULIER

Ingénieur-Électricien, Expert près la Cour d'Appel
Inspecteur de l'Enseignement Technique
Rédacteur en chef de la **Revue générale de l'Électricité**

LEÇONS PRATIQUES D'ÉLECTRICITÉ INDUSTRIELLE
(DEUXIÈME PARTIE)

LES COURANTS ALTERNATIFS

LE COURANT ALTERNATIF. — SELF-INDUCTION. — CAPACITÉ. —
PUISSANCE EN COURANT ALTERNATIF. — MESURE DES COURANTS
ALTERNATIFS. — CALCUL DES APPAREILS A COURANTS
ALTERNATIFS. — FACTEUR DE PUISSANCE ET COSINUS φ . —
CALCUL DES LIGNES A COURANTS ALTERNATIFS. — COURANTS
ALTERNATIFS POLYPHASÉS. — COURANTS DIPHASÉS ET TRI-
PHASÉS. — CALCUL DES LIGNES A COURANTS TRIPHASÉS. —
CALCUL COMPLET D'UN TRANSFORMATEUR. — MOTEURS A
COURANTS ALTERNATIFS.

SIXIÈME ÉDITION

Entièrement refondue, revue et augmentée



PARIS
ÉDITIONS GARNIER FRÈRES

6, RUE DES SAINTS-PÈRES, 6

PRÉFACE

La transmission de l'énergie électrique à de grandes distances exigeant l'emploi de courants alternatifs, simples, triphasés ou même diphasés dont le passage de la haute tension à la basse tension et réciproquement se fait facilement à l'aide des transformateurs, appareils inertes et à bon rendement, il en est résulté que les courants alternatifs ont acquis une vogue considérable et qu'ils tendent à prendre un peu partout la place du courant continu.

Il faut bien se rendre compte en effet que le courant alternatif alimente aussi bien nos lampes à incandescence que le courant continu et que les moteurs triphasés remplacent dans presque tous les cas les moteurs à courant continu tout en présentant une construction plus simple et plus robuste. Restent certaines applications telles que l'électrolyse, la charge des accumulateurs, etc., qui nécessitent l'emploi du courant continu ; mais il a été créé depuis quelque temps des appareils très simples transformant les courants alternatifs en courant continu en sorte qu'il n'existe plus de motif valable pour distribuer dans les villes du courant continu.

Le courant continu a pour lui sa simplicité et bien des personnes familiarisées avec ce courant voient avec peine sa disparition et son remplacement par le courant alternatif qui leur paraît d'allure plus compliquée.

Il est certain qu'à première vue les phénomènes que

l'on observe avec les courants alternatifs peuvent parfois déconcerter les familiers du courant continu et cependant, si l'on creuse un peu, on ne tarde pas à voir que leur mécanisme est facilement explicable pour peu que l'on connaisse les propriétés de la self-induction et de la capacité.

C'est en vue de réconcilier avec le courant alternatif les amateurs du courant continu que nous avons rédigé ce volume ; les premiers chapitres paraîtront peut-être un peu arides mais il importe de les bien posséder si l'on veut aborder ensuite la pratique industrielle des courants alternatifs, pratique que nous avons cherché à traduire sous forme d'exemples et de problèmes pris non pas au hasard et sans aucun lien avec les réalités, comme cela arrive parfois dans certains examens, mais en choisissant au contraire des questions qui se posent journellement, telles que le calcul des fils d'une ligne alimentant des moteurs triphasés ou les lampes de divers ateliers.

Nous montrons également comment on peut établir les dimensions d'une bobine d'inductance, comment on détermine un transformateur industriel répondant à des conditions données, etc. La chose était d'autant plus difficile à résoudre que ces calculs dérivent le plus souvent de formules compliquées que nous avons cherché à éviter tout en rendant notre méthode compréhensible et pratique.

Nous laisserons aux ouvrages spéciaux (auxquels le lecteur avide d'explications supplémentaires pourra toujours recourir) le soin de développer plus mathématiquement que nous ne l'avons fait ici l'étude des phénomènes du courant alternatif ; nous nous sommes plutôt attachés à faire comprendre la nature physique

des phénomènes par des comparaisons qui pourront paraître vulgaires mais qui frapperont mieux l'esprit qu'une longue équation. Loin de nous cependant la pensée de critiquer l'emploi des formules qui sont dans bien des cas nécessaires ; mais nous ne considérons les mathématiques et les équations en particulier que comme un outil, ou même comme un « transformateur » qui ne peuvent rendre que ce qu'on leur a confié. Sous une autre forme, voilà tout. A la base de l'édifice il doit y avoir une saine conception des phénomènes ; sans cela les mathématiques comme les comparaisons hydrauliques peuvent faire dire le contraire de ce qui existe réellement.

Nous n'en voulons qu'un exemple :

Nous avons beaucoup insisté sur une méthode partout employée qui consiste à décomposer un courant alternatif en deux : l'un dit « actif », qui produit ou absorbe de la puissance et ressemble en cela au courant continu ; l'autre « réactif » ou « magnétisant », lequel, ainsi que son nom l'indique, réagit comme nous le montrons et ne sert le plus souvent qu'à entretenir le champ magnétique dans les appareils envisagés.

En réalité, et au point de vue physique, ces deux courants n'existent pas, seule leur résultante intervient ; mais les calculs des appareils et machines sont rendus bien plus aisés par cette décomposition en deux éléments dont les effets sont connus. Ceci vient à l'appui de ce que nous avançons plus haut, c'est-à-dire que les mathématiques ne sont que des intermédiaires rendant plus facile le calcul, mais qui ne doivent jamais faire perdre de vue la nature vraie du phénomène, quelles que soient les transformations qu'on lui a fait subir.

A. S.

ÉLECTRICITÉ INDUSTRIELLE

LES COURANTS ALTERNATIFS

PREMIÈRE PARTIE

NOTIONS FONDAMENTALES

CHAPITRE PREMIER

Le courant alternatif

Comparaison hydraulique. — Prenons deux flacons tubulés dans le bas et réunissons-les par un tube en caoutchouc (fig. 1). Ces flacons sont d'un usage courant dans les laboratoires de chimie, où ils servent à préparer des gaz tels que l'hydrogène ou le gaz carbonique. Si nous supposons les deux flacons posés sur une table et si nous versons de l'eau dans l'un d'eux, A par exemple, cette eau s'écoulera par le tube, et, en vertu du principe des vases communicants, s'élèvera dans le flacon B jusqu'à ce que les niveaux au repos dans A et dans B soient sur une même ligne horizontale. Jusqu'ici rien que de très naturel, c'est le principe même du niveau d'eau.

Suspendons le flacon B à une corde passant sur une poulie C et, laissant seul sur la table le flacon A, soulevons le flacon B en tirant sur la corde. Nous devinons ce qui va se passer : nous avons réalisé une

différence de niveau d entre les flacons A et B, et aussitôt un *courant* d'eau va s'établir dans le tube, l'eau allant du flacon le plus élevé B vers le flacon le moins élevé A.

Abaissons le flacon B au-dessous de la table, en C par exemple, en laissant descendre la corde : à mesure que le flacon B descend et que les niveaux se

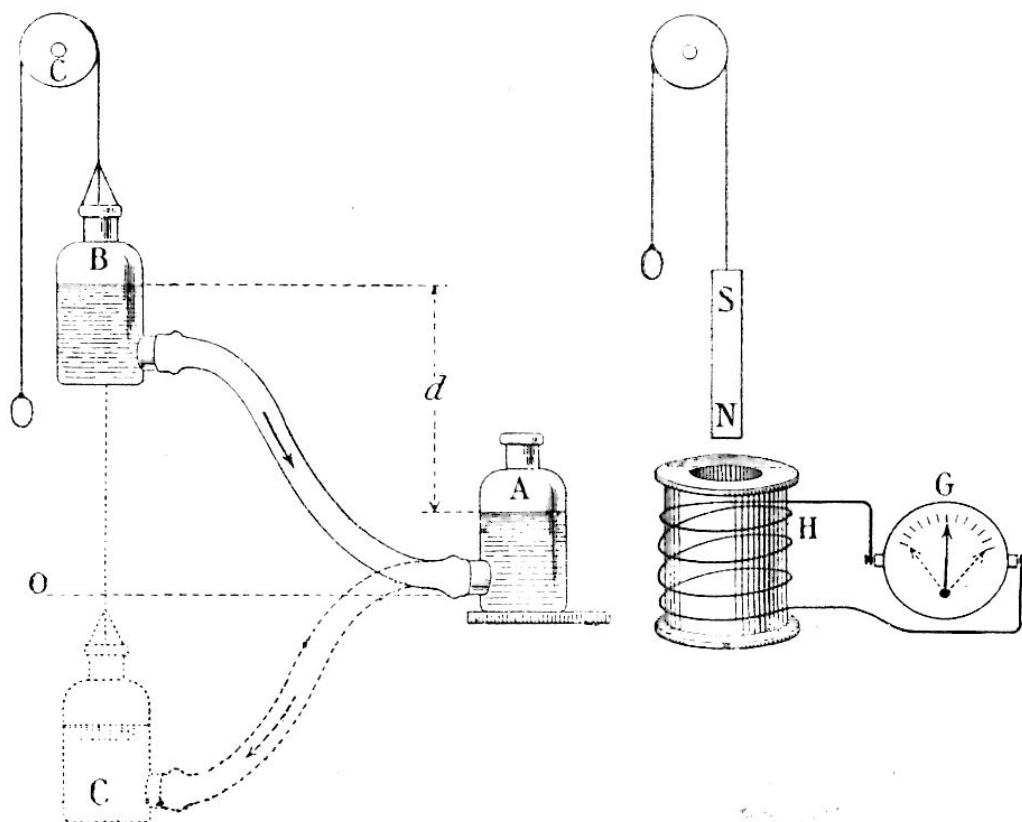


Fig. 1. — Production d'un courant alternatif.

rapprochent, le courant d'eau qui va de B en A diminue, s'annule lorsque les vases sont au même niveau, puis doucement change de sens et va de A vers B lorsque B descend au-dessous de A.

Soulevons le vase B, puis redescendons-le, le même phénomène se reproduira et nous aurons créé un courant d'eau *alternatif* dans le tuyau réunissant les deux vases. Jetons maintenant les yeux sur le côté droit de la figure 1, où l'on a représenté un aimant sus-

pendu à une corde au-dessus d'une bobine H que nous supposerons enroulée avec un fil de cuivre isolé relié à un galvanomètre G.

Si nous laissons descendre l'aimant dans la bobine nous savons (voy. *Le Courant continu*, par A. SOULIER, p. 259) qu'un courant va prendre naissance dans le circuit fermé constitué par la bobine H et le galvanomètre G. Ce courant aura un certain sens tant que durera le mouvement de pénétration de l'aimant dans la bobine.

Soulevons l'aimant en tirant la corde, le courant changera de sens; en manœuvrant ainsi la corde alternativement de bas en haut et de haut en bas, on développera un *courant alternatif* dans la bobine et le galvanomètre.

A ces procédés primitifs ressemblant plutôt à la manœuvre d'un soufflet de forge, substituons un mode opératoire plus moderne, c'est-à-dire utilisant un mouvement circulaire que nous procurera une turbine ou une machine à vapeur.

Conservons notre tube, mais prenons-le en verre en forme d'U pas trop gros (fig. 2) et remplissons-le d'eau colorée, par exemple, ce qui nous permettra de mieux suivre les variations. Relions les extrémités libres formant les deux branches d'U aux fonds d'un cylindre dans lequel se meut un piston P entraîné par une manivelle M qu'actionne une roue R. Le piston, en allant et en venant dans le cylindre, refoulera l'air devant lui et l'aspirera derrière lui et le niveau de l'eau dans le tube en U suivra très exactement les déplacements du piston. Ce niveau descendra de o vers b , dans la branche de gauche, et montera de o vers b' dans la branche de droite quand le piston déplacera dans le sens de la flèche. L'eau suivra fidèlement ces déplacements et nous aurons dans le tube un courant d'eau alternatif suivant très exactement les différences de pression

que le mouvement du piston établit sur les surfaces du liquide.

Cette machine sera un petit *alternateur hydraulique* à courant d'eau ressemblant en tous points aux alternateurs électriques qui sont également actionnés par des machines rotatives.

Pour plus de simplicité on a fait figurer, sous forme d'un cercle avec deux balais m et n correspondant à deux bagues, une des ces machines électriques si répandues aujourd'hui. Ces deux frotteurs m et n captent le courant alternatif qui va de là produire

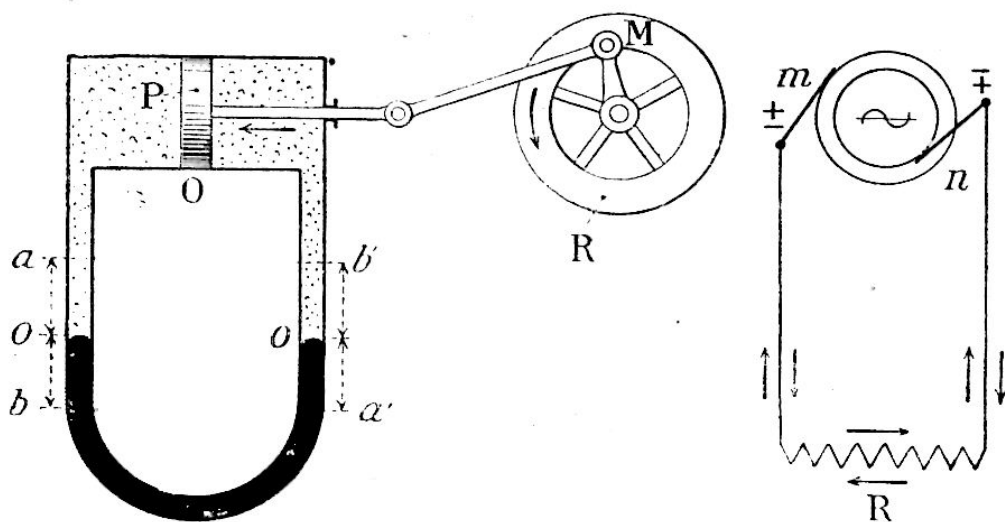


FIG. 2. — Alternateur, analogie hydraulique.

ses effets dans la résistance R , laquelle s'échauffera par exemple.

Jusqu'à présent rien de très compliqué.

Examinons maintenant avec un peu d'attention la liaison qui existe entre le *courant alternatif* et la *différence de niveau* qui le provoque dans les deux cas exposés ci-dessus :

1^o Nous remarquons que la vitesse du courant d'eau, ou si l'on veut *l'intensité* du débit d'eau, est maximum quand le flacon B est à l'extrémité de sa course, c'est-à-dire lorsque la *différence de pression*

est à son maximum; c'est pour cela qu'une fontaine débite d'autant plus d'eau que la pression est plus élevée.

De même dans notre alternateur hydraulique, c'est quand le piston est aux extrémités de sa course que la différence de pression est la plus grande (l'air étant fortement comprimé d'un côté et aspiré de l'autre).

2° Quand les flacons sont sur la même ligne horizontale, ou lorsque le piston est au milieu du cylindre, il n'y a plus de différence de pression et l'eau contenue dans le tube, n'ayant aucune raison pour se déplacer, reste immobile.

Donc à une *différence de niveau* nulle correspond un *courant nul*. Il en est de même pour notre alternateur travaillant sur une résistance R et les courants alternatifs seraient l'enfance de l'art, c'est-à-dire analogues au courant continu, s'ils se contentaient du fonctionnement tel que nous venons de l'indiquer. Rappelons-nous bien dès maintenant que cette simultanéité du courant avec la différence de niveau ou de potentiel n'existe que lorsque l'alternateur travaille sur des *résistances*, telles que des lampes à incandescence, appareils de chauffage, etc. Sur des bobines, faux tout cela, comme nous le verrons bientôt.

Nous pouvons représenter graphiquement le phénomène par des courbes (fig. 3) qui se fixeront mieux dans la mémoire.

La courbe E représente les variations de la différence de niveau; la courbe pointillée I, celle de la vitesse de l'eau ou du débit.

1° Quand les vases sont au même niveau (sur la ligne O) ou lorsque le piston est au milieu de sa course, tout est nul (différence de niveau et débit).

2° Quand le vase B est soulevé, peu à peu la différence de niveau augmente et le débit croît;

les deux courbes montent et atteignent leur maximum en B quand le vase B très haut est sur le point de redescendre; c'est alors en effet que le débit est le plus grand puisque la différence de niveau est maximum.

Le vase redescendant de B en O, la différence de niveau diminue ainsi que l'intensité, comme l'indiquent les deux courbes, et en O tout s'annule encore (point 1 des courbes). Le vase redescendant au-dessous de O, la différence de niveau augmente en

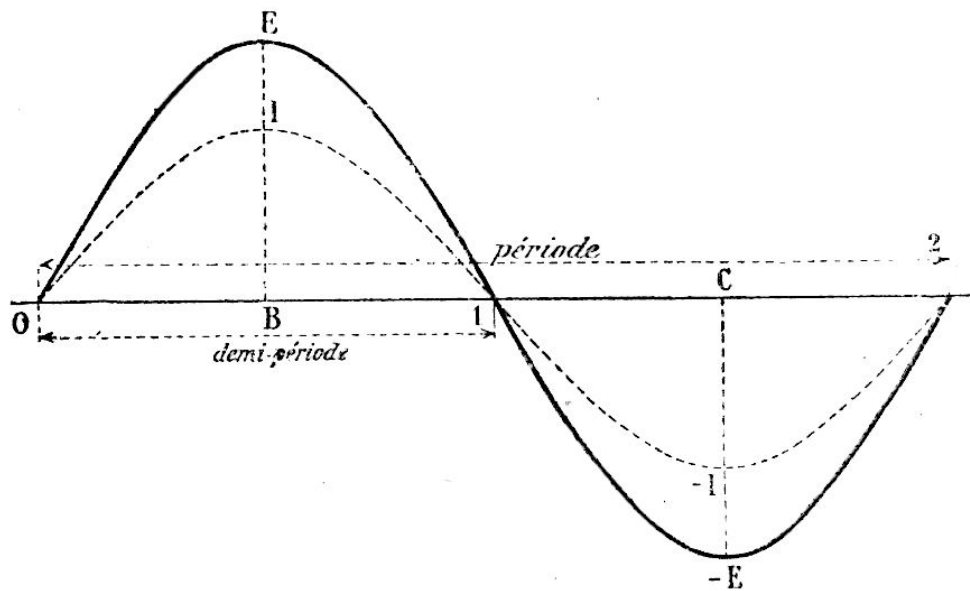


FIG. 3. — Courbes du courant alternatif.

sens inverse et le courant d'eau change de sens, c'est pourquoi les courbes passent au-dessous de la ligne horizontale; le maximum est atteint en C, puis tout diminue et s'annule en 2. On a fait parcourir au système un *cycle* complet, c'est-à-dire que le vase B est revenu au point de départ après être monté et descendu, de même que le piston est allé et venu, après un tour complet de la manivelle. La succession des faits ci-dessus correspond à *une période* du phénomène, elle est représentée par la partie O-2 des courbes qui se répète ensuite indéfiniment.

La *fréquence* est le nombre de *périodes* complètes qui se produisent pendant une seconde. Si nous soulevons et abaissons le vase B de telle façon que parti de O le vase B soit soulevé, ramené en O, abaissé et revenu enfin en O dans un temps total d'une seconde, nous dirons que la fréquence du courant est de *une période par seconde*.

Il a fallu faire vite pour cela; cependant, si l'on songe que les courants alternatifs industriels se succèdent à l'allure de 40 à 50 *périodes par seconde*, on se rendra compte qu'il ne soit pas très facile de les suivre dans leurs mouvements, et cependant on y arrive, comme nous le verrons plus loin.

Que dira-t-on des courants dits à *haute fréquence* qui atteignent les valeurs considérables de 100 000 à 200 000 périodes par seconde et plus encore!

Avant d'aller si vite, abordons un chapitre utile entre tous, celui de la *self-induction*, il nous vaudra quelques surprises.

CHAPITRE II

Self-induction

Inertie. — Considérons un lourd volant (fig. 4) manœuvré par une manivelle et entraînant, par exemple, une pompe. Nous savons, pour l'avoir

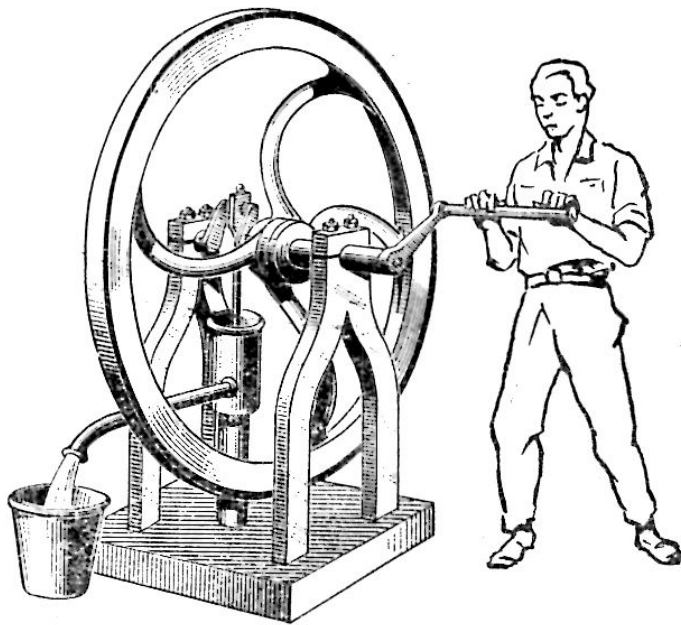


FIG. 4. — Inertie présentée par un volant.

essayé, que lorsqu'on prend la manivelle pour mettre le volant en mouvement, on sent une résistance pour si bien graissés que soient les axes. Le volant s'*oppose* à une mise en mouvement rapide,

puis peu à peu nous arriverons à le lancer, et quand il aura pris une certaine vitesse, nous savons que si nous essayons d'arrêter la manivelle, nous serons entraînés par le volant qui, cette fois encore, s'opposera au mouvement retardateur que nous nous efforçons de lui communiquer.

On traduit cela en langage scientifique en disant que le volant présente de l'*inertie*. C'est encore à cause de l'inertie qu'un train, surtout, s'il est long et très chargé, un train de marchandises par exemple, met un certain temps pour prendre sa vitesse normale lorsqu'il part d'une gare. Au contraire, avant d'arriver à la station suivante, quelquefois un kilomètre avant, le mécanicien supprime l'action de la vapeur, et c'est par son inertie seule que le train franchit le dernier kilomètre.

Il semble que nous nous sommes quelque peu éloignés de notre sujet, les exemples ci-dessus n'ayant rien d'électrique; il n'en est rien, nous allons retrouver ces mêmes phénomènes dans les machines électriques, comme on va le voir.

Self-induction. — Supposons que nous ayons à notre disposition pour quelques instants une grosse dynamo à enroulement inducteur en dérivation (fig. 5), c'est-à-dire formée d'un fil relativement fin faisant un grand nombre de tours; ce sera par exemple une dynamo multipolaire d'une usine importante. Prenons une batterie d'accumulateurs P, ou, à la rigueur, une série de bonnes piles à sac, et relions-la aux deux bornes 1, 2 formant les extrémités de l'enroulement inducteur en intercalant un ampèremètre A sensible, du type apériodique, c'est-à-dire dont l'aiguille ne se balance pas trop longtemps. Quelle ne sera pas notre surprise de voir que le courant électrique n'atteint pas sa valeur normale dès que le circuit est fermé; nous voyons l'aiguille

monter peu à peu et se fixer à la valeur correspondant à l'intensité déduite de la loi d'Ohm :

$$I = \frac{E}{R}.$$

Si nous répétons la même expérience en remplaçant l'inducteur par un rhéostat équivalent, c'est-à-dire par des fils de maillechort tendus sur un

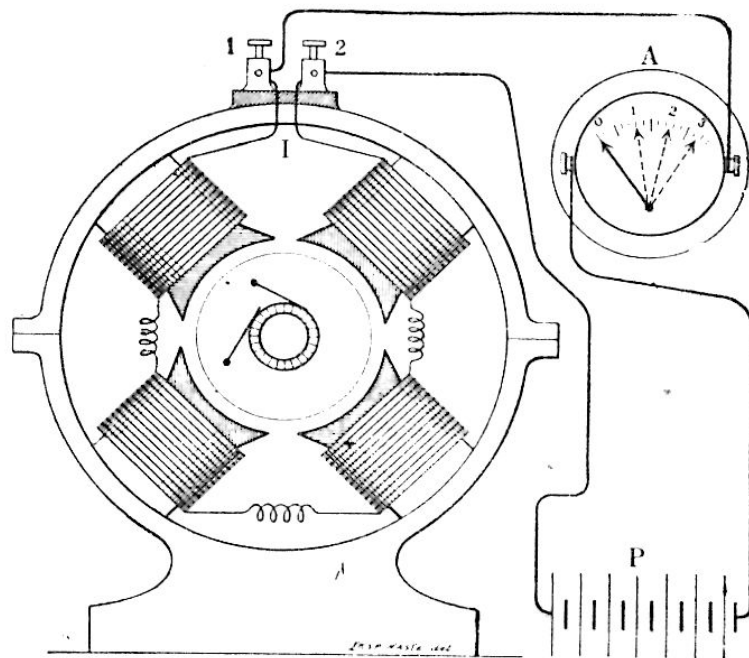


FIG. 5. — Retard dans l'établissement d'un courant.

cadre ayant la même résistance que lui, nous verrons l'aiguille de l'ampèremètre prendre tout de suite sa position d'équilibre.

Ainsi donc, le système inducteur de la dynamo, quoique présentant la même résistance que le rhéostat, ne se laisse pas pénétrer par le courant aussi facilement. En somme, l'enroulement inducteur joue le même rôle que le volant cité plus haut : il oppose de l'*inertie* électrique à l'établissement du courant,

ce que l'on traduit en disant qu'il présente de la *self-induction* ou mieux de l'*inductance*.

Lorsque nous rompons le courant, il y a dans le cas de l'enroulement inducteur production d'une longue flamme entre les deux fils que l'on sépare; le courant ne veut pas s'arrêter, il continue à passer à travers l'air sous la forme d'une large étincelle; au contraire, rien de semblable ne se produit avec le rhéostat.

En analysant le phénomène, on voit, ainsi que nous l'avons montré dans la première partie de ces leçons (1), que c'est à l'aimantation que l'on doit l'attribuer, aimantation qui n'existe pas ou est extrêmement faible dans le rhéostat.

Mais que va-t-il se passer si l'on relie un enroulement analogue à notre inducteur de dynamo à une source de courant alternatif, courant constamment variable?

Self-induction et courant alternatif. — Pour bien saisir ce qui se passe, car ce point est fondamental, nous reprendrons un instant nos comparaisons hydrauliques.

Considérons (fig. 6) le piston actionné par une manivelle, se déplaçant dans un cylindre; ce sera le même que celui de la figure 2, mais nous remplacerons le tube étroit qui reliait les extrémités du cylindre par un tube en verre très gros contenant également un liquide coloré. Des bouchons en caoutchouc percés d'un trou serviront à le relier à notre cylindre. Faisons tourner la manivelle qui entraîne le piston assez lentement pour voir ce qui va se passer.

Nous remarquerons que le piston parti de la position *o* s'avancera jusqu'à *a* sans que le liquide ait

(1) *Leçons pratiques d'électricité industrielle*, 1^{re} partie : *Le courant continu* par A. SOULIER, p. 265.

bougé. Il y a cependant une différence de pression entre les deux niveaux, mais le liquide ne s'est pas mis en mouvement parce qu'il représente une masse assez considérable, c'est-à-dire qu'il oppose son *inertie* au mouvement. Peu à peu il se mettra en marche et la vitesse de déplacement du courant liquide atteindra son maximum quand le piston, continuant son chemin, sera revenu en *o*.

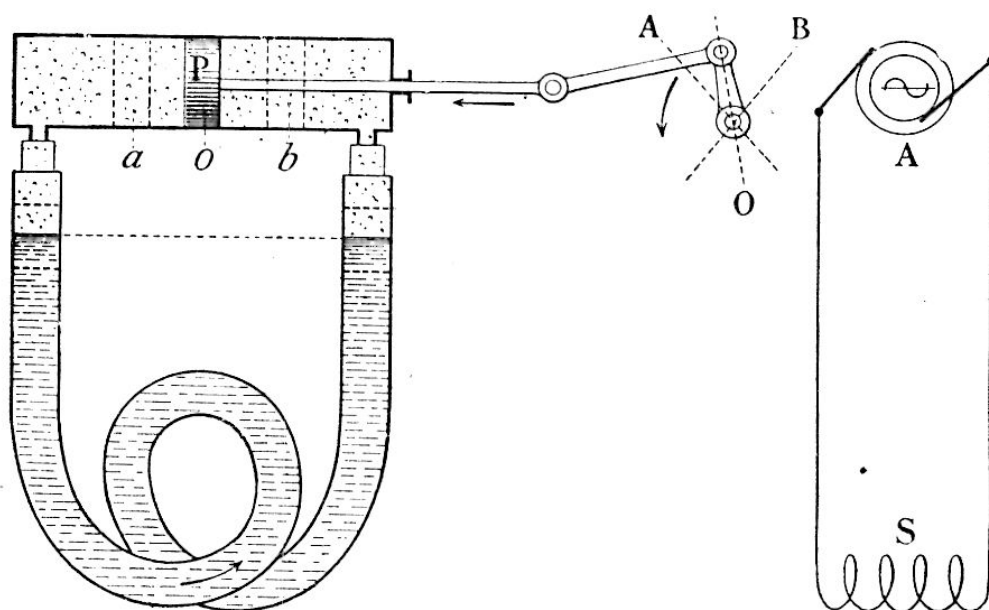


FIG. 6. — Analogie hydraulique de la self-induction.

A partir de ce moment la différence de pression que crée le piston se déplaçant vers la droite change de sens ; l'air est comprimé vers la droite, aspiré vers la gauche ; le liquide lancé dans le sens de la flèche tend à s'arrêter, et c'est quand le piston est arrivé en *b* que le courant liquide s'annule.

Le piston revient vers le point *o* et le courant liquide s'établit en sens inverse de la flèche, c'est-à-dire dans le sens du mouvement du piston. Quand le piston est en *o* la différence de pression est nulle ou à peu près et la vitesse du liquide atteint son maximum. Cette vitesse décroît ensuite et s'annule lorsque

le piston P étant arrivé en *a* a comprimé l'air à gauche et l'a aspiré à droite, et ainsi de suite.

Il résulte de tout ceci que le courant liquide atteint son maximum de vitesse quand la cause qui l'a provoqué a cessé d'agir (différence de pression nulle, piston au milieu).

Au contraire, le courant liquide s'annule lorsque le piston, étant aux extrémités de sa course, réalise la différence de pression maximum. Le courant est donc constamment en *retard* sur la différence de pression qui l'a provoqué. C'est exactement ce qui se passe dans une bobine de self-induction ou d'inductance S que nous supposons parfaite et que nous relions à un alternateur A.

Au début, dès que la différence de potentiel croît, la self-induction s'oppose au passage du courant en faisant l'effet d'un vrai écran, comme cela avait lieu pour le courant de la pile; puis, dès que la différence de potentiel décroît, en vertu de la loi de Lenz, tout se passe comme si un courant se superposait au premier en vue de s'opposer à son affaiblissement; le courant augmente donc tandis que la différence de potentiel diminue, il a son maximum quand la différence de potentiel est nulle.

En somme, à cause de la loi de Lenz, les variations périodiques du courant alternatif font naître dans la bobine de self-induction, appelée aussi bobine d'*inductance* pour mieux en exprimer le rôle, une *force contre-électromotrice* s'opposant constamment à ces changements de sens; son effet est de *retarder* le courant qui traverse la bobine et de diminuer son intensité. Si nous étions assez habiles pour suivre ces variations du courant (1), nous verrions que si l'on

(1) Il existe des appareils suffisamment rapides, tels que les oscillographes, qui permettent de voir très nettement les variations périodiques du courant et de l'intensité; on arrive même à les photographier très nettement. (V. pp. 55-60.)

représente, comme dans la figure 1, par une courbe E la différence de pression, la courbe correspondant à l'intensité est en *retard* sur la première; ainsi quand la différence de pression sera maximum (point m), l'intensité I est nulle, puis E diminue, s'annule en h : à ce moment le courant I atteint son maximum (fig. 7).

La différence de pression change de sens, le courant décroît, s'annule en p quand la différence de pression est à son maximum négatif et ainsi de suite. Comme ab représente une période complète, ac correspond à

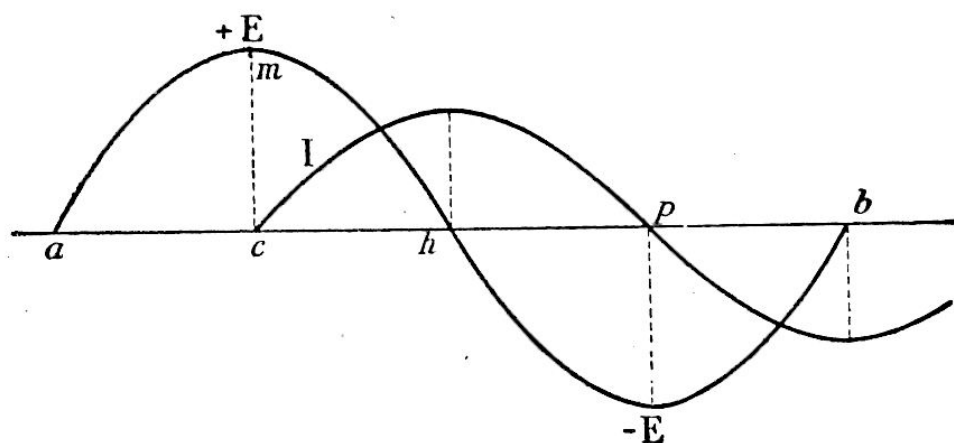


FIG. 7. — Courbes montrant le retard d'un courant sur la force électromotrice.

un quart de période. Le courant I est donc en retard d'un quart de période sur la différence de potentiel, qui l'a provoqué par le seul effet de la self-induction.

Différence de phase. — Il existe une application très répandue de la succession de deux mouvements identiques à un quart de période d'intervalle, ou si l'on veut, présentant une *différence de phase* d'un quart de période : on la trouve dans la machine à vapeur.

La figure 8 représente le schéma d'une telle machine dans laquelle le mouvement de l'excentrique est en

retard d'un quart de période sur celui de la manivelle.

On a représenté à dessein une machine à tiroir moderne à deux pistons équilibrés; on voit nettement que c'est lorsque le piston moteur est vers le milieu de sa course que le tiroir débouche complètement la lumière de droite, permettant ainsi à la vapeur d'agir à pleine pression sur le piston.

A mesure que le piston s'avance vers l'extrémité gauche de sa course, l'excentrique, dont le calage fait un angle de 90° avec la manivelle, ramène le tiroir

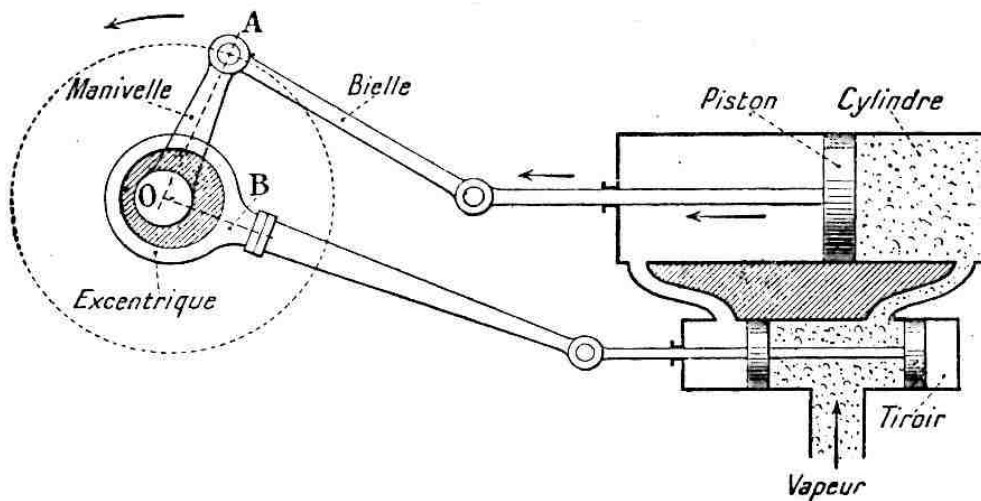


FIG. 8. — Schéma d'une machine à vapeur.

vers la gauche, ce qui a pour effet de supprimer l'admission de la vapeur, puis, quand le piston commence à revenir vers la droite, l'excentrique continue à entraîner le tiroir vers la gauche et fait entrer la vapeur de l'autre côté du piston, et ainsi de suite.

On voit clairement, par ce schéma de machine dont le fonctionnement se devine, que les mouvements de la manivelle et de l'excentrique sont identiques, mais que leurs différentes phases se produisent à un quart de tour d'intervalle.

En réalité, l'excentrique n'est pas calé exactement à 90° par rapport à la manivelle, mais il fait avec elle un angle un peu plus petit de façon à permettre

l'avance à l'admission et l'avance à l'échappement, dont le rôle dans la machine à vapeur nous entraînerait trop loin. Si nous signalons ce point particulier, c'est qu'avec la self-induction il en est de même : le décalage du courant sur la différence du potentiel qui l'a provoqué n'est de 90° , c'est-à-dire d'un quart de période, que sur une self-induction parfaite, en réalité aucune inductance n'étant parfaite; l'angle est toujours inférieur à 90° .

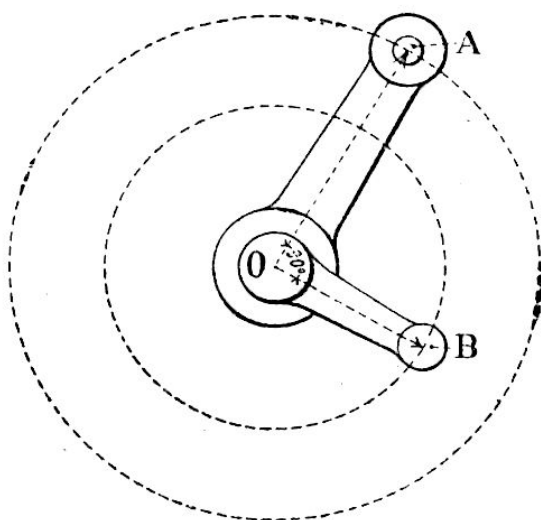


FIG. 9. — Principe des vecteurs.

Vecteurs. — Au lieu de représenter la différence de potentiel et l'intensité par les deux courbes de la figure 7, on se contente, le plus souvent, d'indiquer leur valeur par deux traits ou *vecteurs* partant d'un centre. Il est convenu que la longueur de ces vecteurs est proportionnelle aux valeurs maxima des deux phénomènes considérés.

Cela revient à représenter par un simple trait la direction OA de la manivelle, et par OB la direction du sommet de l'excentrique; l'angle AOB est l'angle que font la manivelle et l'excentrique, théoriquement de 90° , pratiquement un peu moins.

De même (fig. 9), OA pourra représenter la diffé-

rence de potentiel, et OB l'intensité, l'angle AOB étant le retard que présente l'intensité sur la tension. On pourra faire en sorte que la longueur OA soit proportionnelle à la valeur maxima mc de la différence de potentiel et la longueur OB proportionnelle à la valeur maxima de l'intensité. (fig. 7).

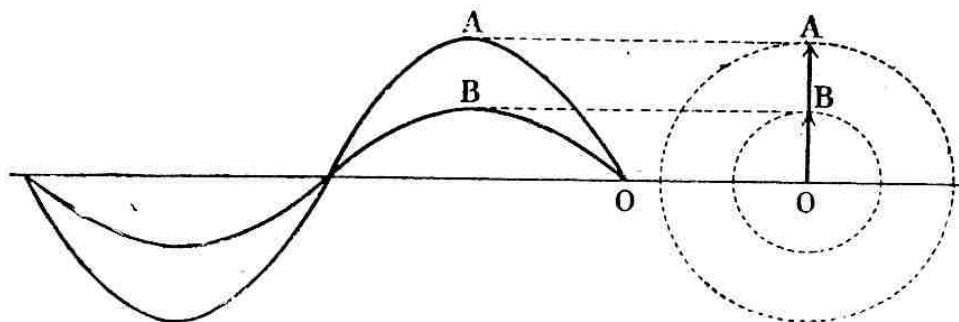


FIG. 10. — Courbes en phase, vecteurs en coïncidence.

Si le circuit est une résistance sans self-induction les courbes coïncident, avons-nous dit (p. 6). C'est le cas le plus simple, celui où la loi d'Ohm s'applique, les vecteurs OA et OB sont dans le prolongement l'un de l'autre (fig. 10).

Si au contraire, le circuit contient une self-induc-

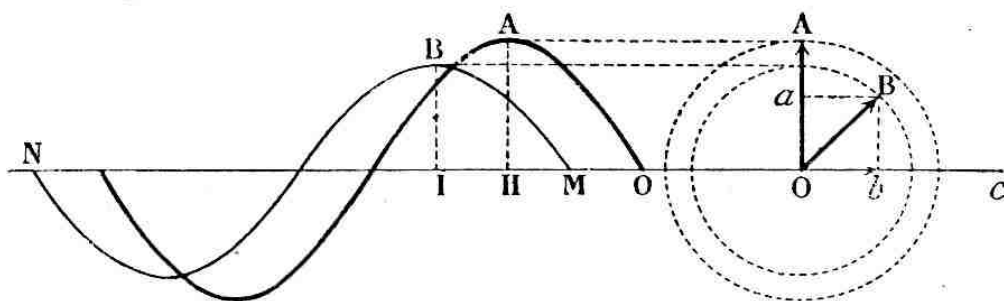


FIG. 11. — Représentation du décalage.

tion, le courant est retardé, sur la différence de potentiel, d'une certaine valeur telle que si MN (fig. 11) correspond à un tour ou cycle complet, il suffira de diviser MN en 360 parties et de prendre le nombre de ces parties séparant un des maxima de la diffé-

rence de potentiel du maximum de l'intensité, ce nombre correspondra au nombre de degrés que devra avoir l'angle AOB.

Composantes. — L'analyse des phénomènes qui se passent dans une bobine d'inductance va se trouver singulièrement simplifiée par la remarque suivante :

Les vecteurs OA et OB peuvent chacun être assimilés à une force émanant d'un même point O. Or, si la mécanique nous apprend que des forces peuvent se composer, inversement, on peut décomposer une force en deux ou plusieurs composantes.

Prenons le cas général de la pratique, où la self-

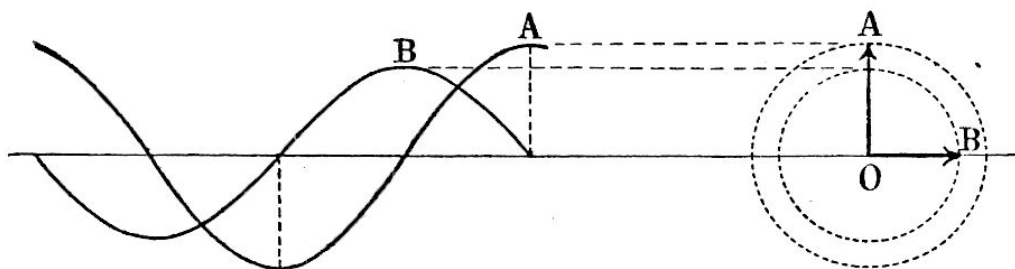


Fig. 12. — Courants en quadrature.

induction n'est pas parfaite et provoque un décalage du courant sur la différence de potentiel d'un angle tel que AOB, qui peut être quelconque, mais en tous cas intérieur à 90° .

Nous pouvons décomposer OB (fig. 11) en deux composantes : l'une Oa que nous placerons dans le sens de OA, l'autre Ob perpendiculairement à OA. Cela reviendra à décomposer le courant OB en deux autres courants, l'un en concordance avec la différence de potentiel OA, l'autre, comme celui qui aurait traversé une self-induction parfaite, à 90° ou en *quadrature* avec la différence de potentiel.

Le premier de ces courants sera équivalent à celui de la figure 10, c'est-à-dire identique à celui qui traverserait une simple résistance. On l'appelle

courant actif nous verrons plus tard pourquoi. Quant à l'autre qui est en croix ou en *quadrature* avec la différence de potentiel, nous l'appellerons *courant réactif* (fig. 12).

La figure 13 donne une idée de la façon dont s'opère la décomposition en question.

OA et OB sont les rayons de deux cercles correspondant l'un OA à la différence de potentiel maxima, l'autre OB à l'intensité maxima. L'angle AOB est le retard de l'intensité sur le courant dû à la self-induction. Abaissons de B une perpendiculaire sur le rayon OA, elle rencontre ce rayon en *a* et *Oa* est la

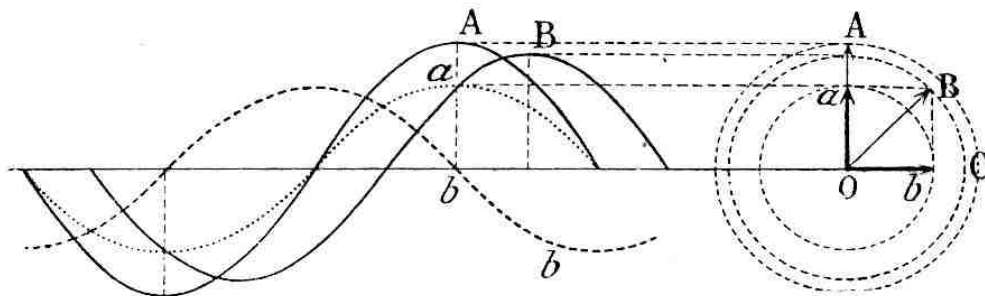


FIG. 13. — Décomposition d'un courant en deux courants fictifs.

composante de l'intensité *en phase* avec la différence de potentiel. Abaissons encore de B une perpendiculaire sur le rayon OC à 90° , qui est en croix avec OA, nous aurons à la rencontre le point *b* et *Ob* est la composante en quadrature de l'intensité OB. C'est bien exact. puisque le parallélogramme des forces *OaBb* nous donne pour résultante OB. De même, mais c'est moins clair, la courbe B de l'intensité (partie gauche de la figure) peut se décomposer en deux autres pointillés *a* et *b*, l'une *a* en phase ou marchant d'accord avec la différence de potentiel A, l'autre *b* avec décalage d'un quart de période comme le serait l'intensité du courant dans une self-induction parfaite.

REMARQUE. — Ne perdons pas de vue que cette décomposition du courant principal en deux composantes ou en deux autres courants est purement imaginaire et ne sert qu'à faciliter les calculs. En réalité, il n'y a qu'un seul courant, mais comme les opérations seraient très compliquées sans cet artifice, on nous permettra d'y recourir ainsi qu'on le fait partout, à une condition, c'est de bien retenir qu'au point de vue physique et réel, il n'y a que le courant principal, *qui existe seul*.

Mais en voilà assez pour l'instant sur ce sujet, nous aurons, du reste, l'occasion de revenir sur la self-induction, car on la rencontre à chaque pas dans l'étude des courants alternatifs. Une fois acquise la notion bien nette du retard du courant introduit par la self-induction dans un circuit, nous passerons à l'étude des propriétés non moins curieuses de la capacité.

CHAPITRE III

Capacité

Deux surfaces conductrices séparées par un isolant (1) constituent une *capacité*. Si l'on relie chacune de ces surfaces à l'un des pôles d'une source d'électricité à courant continu, pile ou dynamo, il s'accumulera sur les deux surfaces en regard une *charge* électrique que l'on pourra mettre en évidence en supprimant la source et en reliant les deux surfaces aux bornes d'un galvanomètre sensible à période d'oscillation très lente. Si les surfaces sont suffisamment étendues et rapprochées (feuilles d'étain séparées par du papier), on observera une déviation brusque du galvanomètre lorsque la communication des feuilles d'étain avec la source ayant été supprimée, on reliera les feuilles au galvanomètre.

Ce phénomène pourra être répété aussi souvent qu'on le voudra, sans qu'il en résulte une altération des feuilles; on pourra utiliser le galvanomètre pour constater que la charge est d'autant plus considérable que la surface des feuilles d'étain est plus grande. Cette charge dépend également de la force électromotrice de la source. Ainsi, avec 100 volts, elle sera

(1) On nomme quelquefois *diélectrique*, tout corps qui s'oppose au passage du courant : le verre, la parafine, l'ébonite, la porcelaine, le papier, l'air, etc., sont des diélectriques.

deux fois plus considérable qu'avec 50. Enfin, on remarquera que cette charge est acquise au bout d'un temps très court, pratiquement inférieur à une seconde. De même, la durée du courant de décharge est très petite; si on l'observe au galvanomètre, c'est que ce dernier a été choisi à dessein à période lente, de telle façon que la décharge produit sur lui l'effet d'une chiquenaude qui chasse l'aiguille d'autant plus loin que cette décharge est plus forte, ou, pour parler plus scientifiquement, que la quantité d'électricité qu'elle représente est plus considérable. Le lancé ainsi obtenu sur le galvanomètre porte le nom d'*élongation*.

Nous basant sur cette expérience, nous dirons que la quantité d'électricité Q ainsi emmagasinée dans le condensateur est proportionnelle à la capacité, c'est-à-dire à la surface des feuilles d'étain, et proportionnelle à la force électromotrice E de la source, ce qui s'écrit :

$$Q = CE.$$

Et avec du courant alternatif, que se passe-t-il?

Capacité et courant alternatif. — Si l'on relie chacune des feuilles d'étain d'un condensateur, ou *armatures*, aux deux fils d'une distribution de courant alternatif ou, si l'on aime mieux, à un *alternateur*, notre condensateur va se charger, tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre, en se déchargeant dans l'intervalle. Pour bien se rendre compte de ce qui va se passer, nous aurons encore recours aux comparaisons hydrauliques.

Reprenons nos deux flacons tubulés A et B de la page 2 réunis par un tuyau en caoutchouc. Coupons ce tuyau de caoutchouc vers son milieu et intercalons deux entonnoirs en verre, opposés par la base (fig. 14), entre lesquels nous tendrons une membrane F en

caoutchouc, évitant toute communication directe entre les deux vases. (Pour que l'expérience réussisse, on mastiquera avec du chatterton, par exemple, les bords de l'entonnoir, de façon à ce que le tout soit bien étanche, et qu'il n'y ait pas de fuite de liquide.) Les deux vases étant au même niveau et contenant une même hauteur d'eau, la membrane en caoutchouc

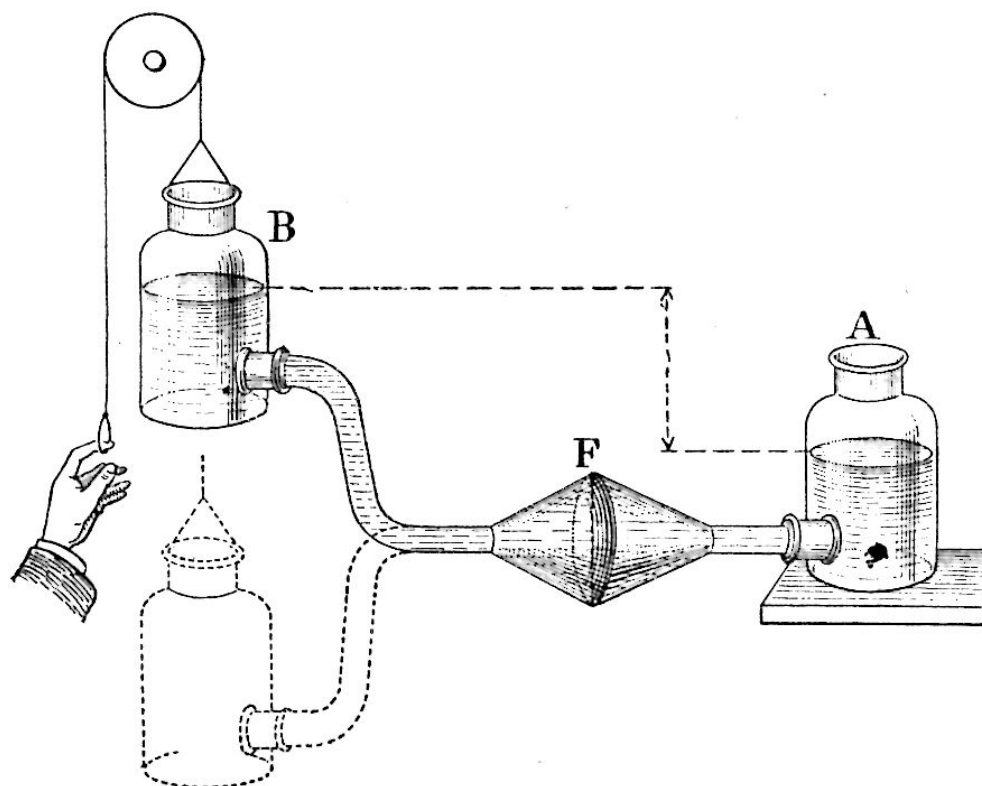


FIG. 14. — Représentation du fonctionnement d'une capacité avec du courant alternatif.

qui forme cloison flexible entre les deux entonnoirs se tiendra verticale, n'ayant aucune raison pour s'incliner dans un sens plutôt que dans l'autre.

Élevons le vase B au-dessus du vase A, l'eau du vase B va tendre à aller dans le vase A, mais elle ne peut passer à cause de la membrane F. La membrane va s'incurver et se tendre dans la direction du vase A.

Si nous supposons que F est notre condensateur, nous avons réalisé ce qui se passait dans notre expé-

rience précédente, quand nous chargeons notre condensateur en le soumettant à une différence de potentiel continue. Aucun courant ne passe, mais la membrane reste tendue.

Ramenons le vase B à sa position primitive, c'est-à-dire à la hauteur du vase A. A ce moment la différence de hauteur est nulle, mais la membrane aura hâte de reprendre sa place et elle va chasser le liquide vers le flacon B, entraînant derrière elle celui de A : c'est la décharge du condensateur.

Continuons à abaisser le flacon B, le courant liquide circulera de A vers B jusqu'au moment où la membrane F, tendue suffisamment en sens inverse, arrêtera la circulation du liquide. A ce moment la différence de niveau sera cependant grande, mais le courant sera nul.

Relevons le vase B et ramenons-le au niveau de A. La différence de niveau diminuant, la membrane est soulagée, elle va tendre à reprendre sa place en provoquant un mouvement du liquide de B vers A.

Continuons à relever B, le courant continuera de B vers A en diminuant peu à peu à mesure que la membrane se tend, puis, arrivés au haut de notre course le courant liquide cessera, malgré que la différence de niveau soit maxima, parce que la membrane tendue d'une quantité en rapport avec cette différence de niveau s'oppose à tout mouvement du liquide.

En résumé, nous remarquons :

1° Qu'à une différence de niveau maxima correspond un courant *nul*;

2° Qu'à une différence de niveau nulle correspond le courant maximum. Nous avons encore, dans ce cas, une différence d'un quart de période dans les amplitudes maxima des deux mouvements, mais ici, c'est le courant qui est en *avance* sur la différence de niveau, au lieu d'être en retard comme avec le

gros tuyau présentant de l'inertie parce que la membrane le chasse devant elle.

Nous pouvons encore représenter le phénomène ci-dessus par un piston p (fig. 15) pressé par deux ressorts r et r' ce piston pouvant se déplacer dans un cylindre plein d'eau.

Un autre cylindre contenant un piston P mû par une manivelle M peut venir comprimer ou aspirer de

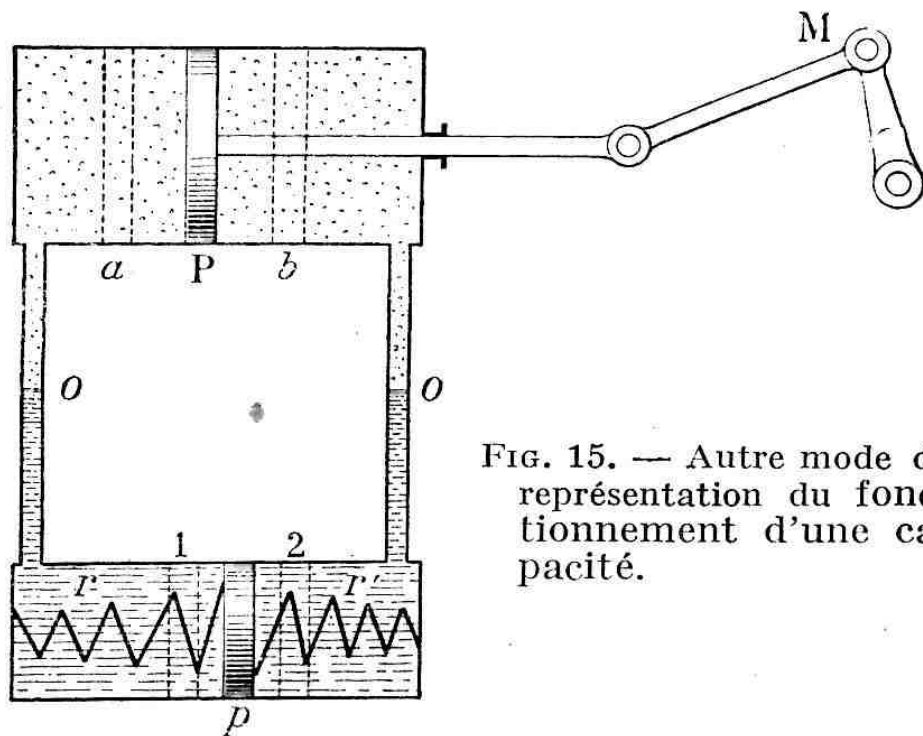


FIG. 15. — Autre mode de représentation du fonctionnement d'une capacité.

l'air à la surface du liquide qui entoure le piston p .

On comprend très bien qu'une différence de pression exercée sur le liquide ait pour effet de chasser le piston p jusqu'à ce que le ressort qu'il comprime limite ce déplacement. Si l'on annule la différence de pression, le piston p est chassé par le ressort qu'il a comprimé et le courant liquide atteint son maximum d'intensité. Et ainsi de suite, les mouvements du piston p , sous l'action des ressorts, seront en avance d'un quart de période sur ceux du piston P .

Notre condensateur relié à un réseau alternatif se

comportera d'une façon absolument identique. Si nous pouvions voir de quelle manière sont disposées, l'une par rapport à l'autre, les courbes représentant les valeurs successives de l'intensité du courant et de la différence de potentiel, nous verrions que la première est en avance d'un quart de période, ou de 90° , sur la deuxième.

Il semble qu'il ne soit pas possible de parler ici d'intensité du courant, puisque l'*isolant* qui sépare les feuilles d'étain dans le condensateur s'oppose au passage d'un courant. C'est bien exact, et aucun courant ne traverse le condensateur au sens propre

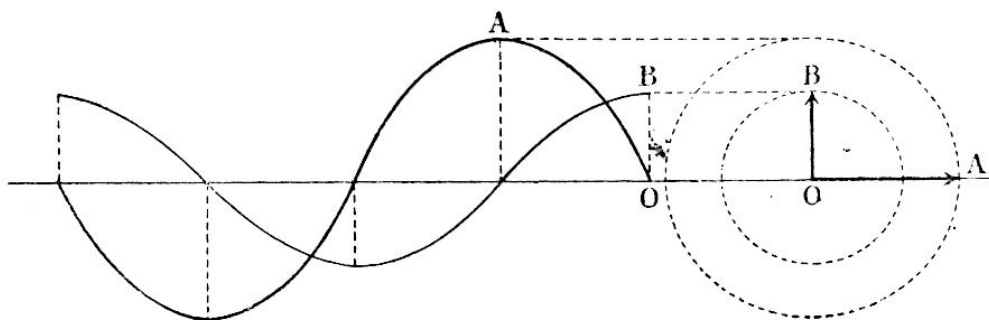


FIG. 16. — Représentation graphique.

du mot (à moins qu'il ne soit mal isolé). Si nous observons, malgré cela, une déviation sur un ampèremètre interposé entre la source alternative et le condensateur, c'est que la série des charges et décharges successives dont les *armatures* du condensateur sont le siège, provoquent dans les fils et dans l'ampèremètre un *déplacement* continu de charges électriques qui équivalent à la circulation d'un courant.

En reprenant notre procédé graphique, nous représenterons le phénomène (fig. 16) par deux vecteurs à angle droit, celui de l'intensité OB étant en avance sur celui OA de la différence de potentiel.

Tandis qu'avec la self-induction le décalage n'at-

teint pratiquement jamais 90° , avec les condensateurs industriels que l'on arrive à très bien isoler, le décalage est de 90° exactement.

Mais alors, une idée vient à l'esprit : si le condensateur décale l'intensité de 90° en avant, tandis que la self-induction retarde cette même intensité, n'y aurait-il pas moyen de marier ces deux appareils, ce qui nous ramènerait l'intensité dans l'ordre des choses ?

C'est ce que nous examinerons dans le prochain chapitre, la question étant intéressante à tous les points de vue.

Condensateurs industriels. — Les condensateurs que l'on rencontre dans l'industrie peuvent se

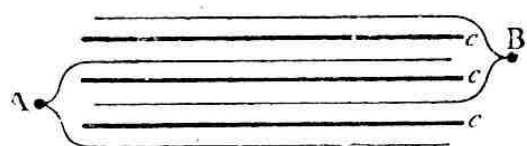


FIG. 17. — Montage d'un condensateur à lames.

rattacher à deux types bien distincts : les uns, utilisés soit comme parafoudres, soit pour aider à produire des courants de haute fréquence utilisés en T. S. F., sont constitués par une bou-

teille ou un tube en verre sur les parois intérieure et extérieure duquel on a, ou bien collé du papier d'étain, ou déposé par voie chimique (condensateurs Moscicki) une couche d'argent. Ces deux surfaces métalliques, ou *armatures*, séparées par du verre, constituent un excellent condensateur résistant à des tensions de *plusieurs milliers* de volts. Malheureusement, ces appareils n'ont pas une très grande capacité parce que la surface des armatures n'est pas très développée, ce qui conduit à en disposer un grand nombre pour avoir une capacité appréciable, d'où il résulte un ensemble cher et encombrant.

On tourne la difficulté en prenant des plaques de

verre entre lesquelles on intercale des feuilles d'étain (fig. 17), mais dans ce cas, si des précautions spéciales ne sont pas prises, des étincelles jaillissent vers les bords des lames de verre qu'elles contournent, réunissant ainsi les armatures.

D'autres condensateurs, bien plus répandus ceux-là, sont formés d'une longue bande de papier fin (papier à cigarettes) sur les deux faces de laquelle on a déposé une sorte de peinture à base d'étain qui fait le même effet qu'une feuille d'étain extrêmement fine. Cette bande est roulée sur elle-même avec interposition d'une autre bande de papier fin et le tout est mis bien serré dans une boîte métallique. Ce sont des condensateurs de ce genre que l'on voit à côté des sonneries, dans les installations téléphoniques des grandes villes établies sur le principe de la *batterie centrale*. Leur rôle est de laisser passer le courant alternatif d'appel qui actionne la sonnerie en s'opposant à la circulation du courant continu de la batterie centrale; leur capacité est assez élevée cependant, ils ne conviennent qu'à des tensions de 50 à 110 volts.

Mais le verre et le papier ne sont pas les seuls isolants, disons les seuls « diélectriques », utilisés dans la construction des condensateurs : le *mica* est un diélectrique très recherché pour la fabrication des condensateurs-étalons employés dans les laboratoires d'électricité. Rappelons que le mica est une pierre qui se « clive » facilement, on arrive à séparer ainsi les unes des autres des feuilles extrêmement minces qui ont la transparence du verre. C'est ce même mica que l'on emploie pour séparer les lames des collecteurs ou que l'on voit sur les portes des poêles mobiles. Mais tandis que c'est l'incombustibilité de cette matière en même temps que sa souplesse qui la fait rechercher pour les collecteurs et les poêles mobiles, c'est une autre propriété qui la fait préférer au verre

et au papier pour les condensateurs, ainsi qu'on va le voir.

Tous les diélectriques : air, verre, papier, mica, possèdent à des degrés divers la qualité de faciliter le phénomène de la condensation, à tel point que si l'on peut dire que la capacité d'un condensateur est proportionnelle à la *surface* des armatures et inversement proportionnelle à l'*épaisseur* du diélectrique qui les sépare, elle est aussi proportionnelle à la qualité diélectrique. C'est ainsi que pour un condensateur ayant une surface définie d'armatures, ces armatures étant séparées par une épaisseur régulière et uniforme d'isolant, la même pour chacun des diélectriques essayés, air, verre, papier, mica, etc., la capacité sera par exemple de 1 avec l'air et deviendra 5 avec le verre, 2 avec le papier et 7 avec le mica.

C'est ce que l'on traduit en langage scientifique en disant que la *capacité inductive spécifique* ou la constante diélectrique varie d'un diélectrique à l'autre.

Voici, dans l'ordre croissant, les pouvoirs inducteurs spécifiques de différents corps. Nous supposons que l'on a constitué, avec deux lames, de surface donnée séparées par une épaisseur d'air déterminée, un premier condensateur dont nous aurons pris la capacité pour unité. Ces mêmes lames, entre lesquelles on aura interposé la même épaisseur précédemment occupée par l'air, mais constituée successivement par les corps ci-dessous, donneront des capacités différentes que nous indiquons :

Air	1	Verre	5
Ébonite	2	Mica	7
Soufre	3	Sélénium	10

Le fait d'avoir parlé de la capacité nous amène à dire un mot de l'unité de capacité.

De même que volt, ampère, watt sont empruntés aux noms des savants du siècle dernier, l'unité de

capacité, ou *farad*, dérive du nom de Faraday, le grand physicien anglais, auquel on doit des lois importantes sur les phénomènes d'électrolyse et l'expérience mémorable qui amena la découverte de l'induction. Un condensateur a une capacité de 1 *farad* lorsque, chargé d'une quantité d'électricité égale à 1 *coulomb*, la différence de potentiel est de 1 *volt* entre ses armatures. Cette notion de capacité se tire de la formule $Q = CE$ que nous avons indiquée précédemment (p. 22).

$$C = \frac{Q}{E}. \qquad 1 \text{ farad} = \frac{1 \text{ coulomb}}{1 \text{ volt}}$$

En réalité, un condensateur de 1 *farad* serait énorme, et, dans la pratique, les condensateurs se mesurent en *microfarads*, soit en millionième de farad. Un condensateur pour téléphone a une capacité de 2 microfarads, les condensateurs de bobine de Ruhmkorff ont 0,2 ou 0,5 microfarad, etc.

Condensateurs électrolytiques. — Les condensateurs ci-dessus exigent un grand volume pour réaliser des capacités appréciables, cependant on est arrivé à obtenir des condensateurs de grande capacité en utilisant des feuilles d'aluminium que l'on fait plonger dans une solution de borate de soude ou de tartrate d'ammoniaque (1). Avec une solution à 20 p. 100 de ce dernier sel on arrive, avec des plaques d'aluminium convenablement formées, à avoir 0,06 microfarad par centimètre carré. Leur bon fonctionnement exige en outre qu'on leur applique périodiquement des surtensions destinées à fortifier la couche diélectrique (procédé A. Soulier).

(1) Voir pour plus de détail, les *Manipulations d'électricité*, par A. SOULIER, p. 189 à 196, Garnier, éditeur.

Représentation des condensateurs. — Pour représenter les condensateurs dans les schémas, nous adopterons le mode ci-dessous, c'est-à-dire 4 traits réunis deux à deux (fig. 18). Ce dessin est peut-être un peu plus compliqué que celui adopté par certains auteurs qui réduisent la représentation du condensateur à deux simples traits parallèles, mais nous préférons les quatre traits, qui représentent mieux les armatures entrelacées des condensateurs de laboratoire et qui, en tous cas, ne prêtent à aucune équivoque. Les deux simples traits, que l'on confond parfois avec la représentation d'une pile, qui s'indique aussi par deux traits (un gros et un petit), ne devraient jamais être employés quand il s'agit d'un condensateur.

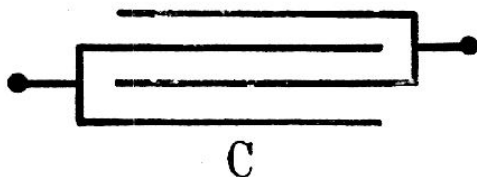


FIG. 18. — Schéma simplifié d'un condensateur.

CHAPITRE IV

Capacité et self-induction

La self-induction et la capacité produisant des effets exactement opposés, c'est-à-dire la self-induction ayant pour effet de mettre en retard le courant sur la force électromotrice et la capacité tendant à avancer ce même courant, on conçoit qu'il puisse y avoir compensation dans certains cas où les effets sont égaux et de sens opposé.

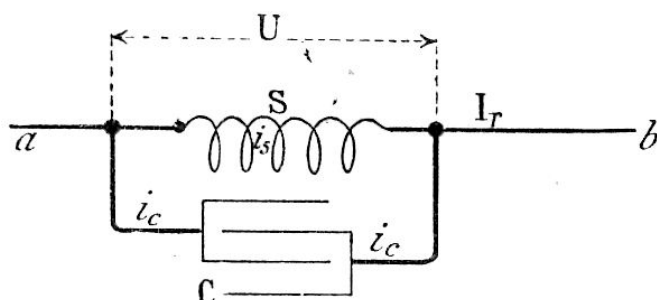


FIG. 19. — Capacité en dérivation sur une self-induction.

1° Self-induction et capacité en dérivation. — Considérons (fig. 19) une bobine de self-induction S en dérivation sur un condensateur C , l'ensemble étant relié par ses extrémités a et b à une force électromotrice alternative que nous désignerons par U . Des courants vont prendre naissance dans ces circuits. Essayons de voir, à l'aide d'un diagramme, ce qui va se passer.

Traçons (fig. 20) une droite horizontale OA, dont la longueur sera proportionnelle à la valeur de la force électromotrice U que nous aura donnée un voltmètre alternatif branché entre a et b , et examinons le cas de chacun des appareils, bobine de self-induction et condensateur, comme s'il était seul.

Prenons le courant dans la bobine de self-induction S ; il est, avons-nous vu, retardé, c'est-à-dire décalé en arrière sur la force électromotrice. Or, si nous supposons, suivant l'usage trigonométrique, que les vecteurs tournent autour de O en *sens inverse* des aiguilles d'une montre, le vecteur représentant l'intensité sera en retard sur OA d'un certain angle AOC ou p qui serait de 90° si la self-induction était parfaite, ce qui n'est pas le cas dans la pratique; nous représenterons donc le courant dans la bobine S par le vecteur OC incliné en dessous de OA d'un angle plus petit que 90° et que nous prendrons d'une longueur proportionnelle à l'intensité i_s lue sur un ampèremètre placé dans le circuit de la self-induction, 10 millimètres par ampère, par exemple, ou toute autre échelle suivant le cas.

Passons maintenant au condensateur C .

Le courant, dans le condensateur, est *en avance* sur la force électromotrice d'un angle que nous pouvons prendre de 90° puisque pratiquement il existe des condensateurs suffisamment bien établis pour avoir ce décalage. Traçons donc, faisant avec

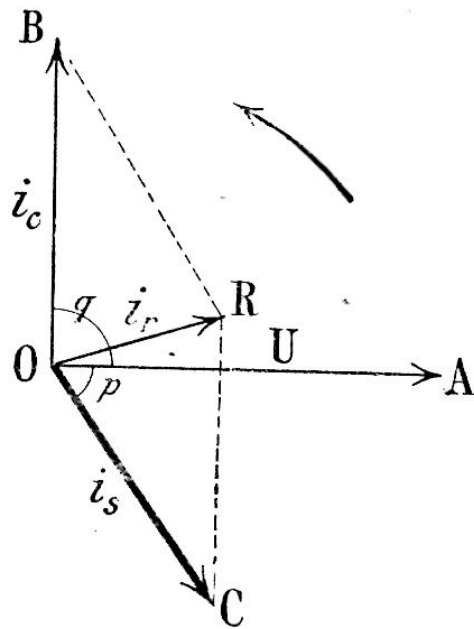


FIG. 20. — Représentation graphique.

OA un angle de 90° , mais en avant dans le sens de la rotation que nous avons pris pour base, une droite OB dont la longueur sera proportionnelle à la valeur de l'intensité de courant i_c lue sur un ampèremètre intercalé dans le circuit du condensateur.

Et c'est tout.

Veut-on avoir le courant résultant, celui que fournit l'alternateur à l'ensemble des deux appareils, considérons OB et OC comme deux forces et composons-les. La mécanique nous apprend qu'il

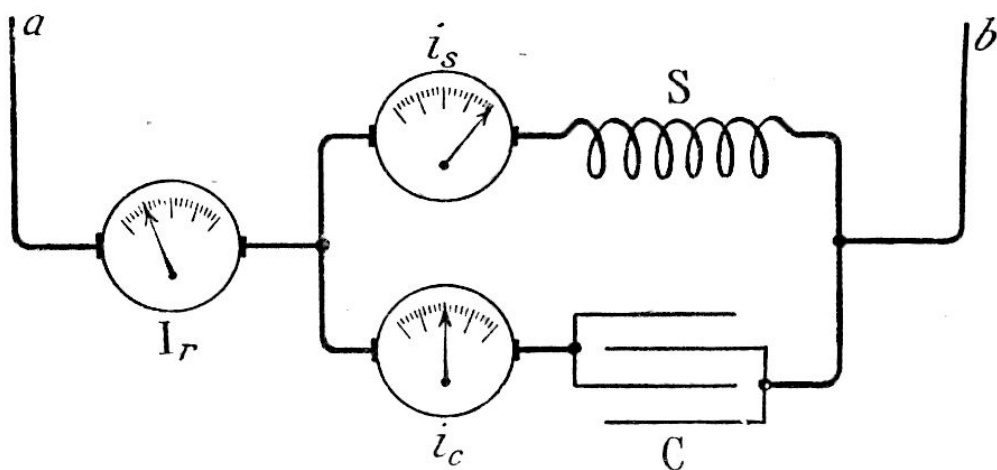


FIG. 21 — Dispositif expérimental montrant la valeur des composantes du courant total.

suffit de construire le parallélogramme des forces qui nous donne en OR la résultante cherchée.

Mesurant au décimètre la longueur OR, nous aurons la valeur de l'intensité du courant résultant i_r en utilisant le même facteur de proportionnalité qui nous a servi pour tracer les valeurs de i_c et de i_s (1).

Tout de suite, au seul aspect de la figure, quelque chose frappe l'esprit : le vecteur OR nous paraît beaucoup *plus petit* que chacun des vecteurs composants i_s et i_c , ce qui nous montre, entre parenthèses,

(1) Ce sera 10 millimètres par ampère, si nous avons pris ce chiffre pour i_c et i_s .

que le courant alternatif fait drôlement les additions !

En voulons-nous la preuve expérimentale ?

Prenons trois ampèremètres (fig. 21) et intercalons-les : l'un avant la self-induction S , l'autre avant le condensateur C et le troisième sur l'arrivée du courant principal avant la bifurcation. Envoyons le courant alternatif dans l'appareil et nous lirons par exemple :

5 ampères	sur l'ampèremètre	i_s de la bobine S ;
2 —	sur —	i_c du condensateur;
et 1 —	—	total i_r .

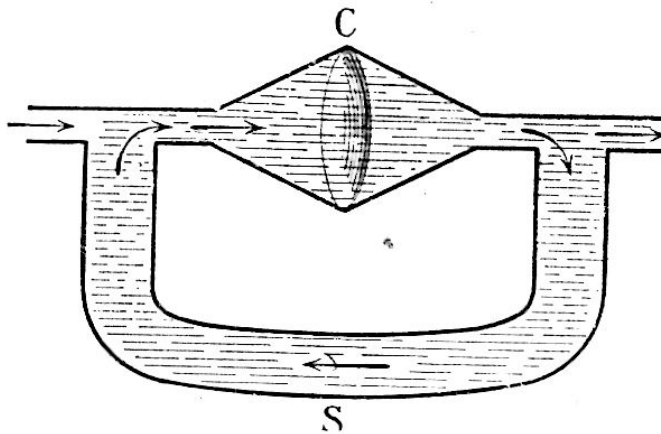


FIG. 22. — Analogie hydraulique.

Ainsi donc, tandis qu'avec du courant continu se bifurquant dans deux circuits absorbant l'un 5 ampères, l'autre 2 ampères, le courant total est de $5 + 2 = 7$ ampères, avec de l'alternatif travaillant sur bobine et sur condensateur, $5 + 2$ a pour somme 1. Voilà qui est quelque peu paradoxal à première vue, mais que la théorie des vecteurs explique très bien. Du reste, notre comparaison hydraulique va nous fournir, elle aussi, une preuve de cette anomalie.

Reprenons nos deux entonnoirs (fig. 22) réunis par leur base et séparés par une membrane flexible en caoutchouc. Établissons en avant et en arrière de la membrane un tuyau gros formant dérivation,

puis faisons monter et descendre le vase B comme précédemment pour créer un courant d'eau alternatif. La membrane va se gonfler et se dégonfler comme nous savons, mais plutôt que de chasser le liquide devant elle, tantôt vers le vase B, tantôt vers le vase A, ce liquide circulera par le tuyau gros S. Du reste, nous pourrions, comme nous l'avons fait plus haut, considérer la branche S comme si elle était seule, nous savons qu'en vertu de *l'inertie*, le courant d'eau est en *retard* sur la différence de niveau qui le provoque. Au contraire, dans les entonnoirs, le courant d'eau chassé par la membrane est en *avance* sur la différence de niveau. Ces deux courants vont donc se concilier et une circulation s'établira comme les flèches l'indiquent, à tel point que le courant d'eau local entre S et C pourra être bien plus important que celui qui vient des vases A et B, ce dernier ne servant qu'à entretenir le mouvement.

Mais, dira-t-on, tous ces discours sont purement théoriques et pratiquement ces phénomènes ne semblent pas devoir se rencontrer fréquemment.

Que l'on se rassure, les applications sont plus nombreuses qu'on ne le pense. Nous n'en citerons que deux :

1° Jetons les yeux sur la figure 23, que voyons-nous? Deux condensateurs en forme de bouteille, en relation par deux fils avec une bobine de self-induction. Une source de courant alternatif non figurée alimente l'ensemble. Des montages de ce genre se rencontraient dans presque toutes les anciennes installations de T. S. F., ou chez les docteurs spécialistes pour la production de courants de haute fréquence;

2° Ainsi qu'on le verra plus loin, le grave ennui des distributions à courant alternatif est de nécessiter des fils plus gros que ceux qui sont nécessaires

pour la transmission d'une puissance donnée à cause du décalage que présente l'intensité sur la force électromotrice. Le seul moyen de réduire ce décalage consiste à employer des condensateurs ou appareils équivalents, qui compensent le décalage qu'introduisent dans le circuit les bobinages des moteurs alimentés.

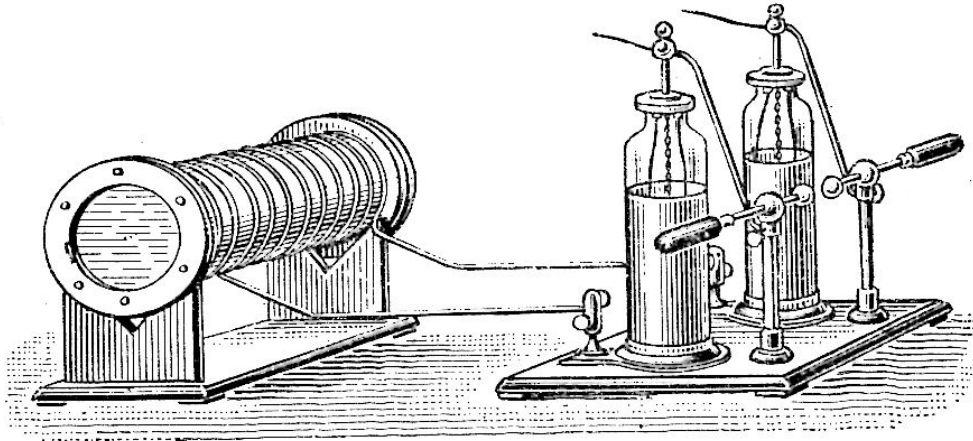


FIG. 23. — Application de la combinaison d'une capacité avec une self-induction.

En veut-on la preuve?

Si nous considérons la figure 21 et que nous retirions le condensateur du circuit, la self-induction va rester seule. Conclusion : l'ampèremètre i_s continuera à marquer 5 ampères, puisque la force électromotrice du réseau n'a pas changé, mais l'ampèremètre total i_r marquera forcément lui aussi 5 ampères.

La présence du condensateur C maintient bien les 5 ampères sur la bobine S, mais n'en demande qu'un au réseau.

2° **Self-induction et capacité en série.** — Si nous montons une bobine de self S et une capacité C en série (fig. 24) et que nous soumettions l'ensemble à la même force électromotrice alternative, un courant I va circuler et ce courant I sera forcément

le même dans les deux appareils, la self-induction S recevant tout le courant du condensateur C et réciproquement.

Dans ces conditions, que va-t-il se passer?

Nous aurons encore recours au diagramme des vecteurs, quitte à vérifier expérimentalement ensuite,

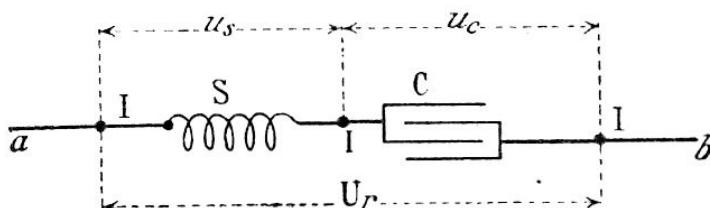


FIG. 24. — Capacité et self-induction en série.

comme précédemment, les conclusions auxquelles il nous aura conduits.

L'intensité du courant I étant commune aux deux appareils, ce sera notre point de départ. Traçons (fig. 25) une droite horizontale OA dont la longueur

sera proportionnelle à la valeur de l'intensité I indiquée par un ampèremètre à courant alternatif disposé dans le circuit.

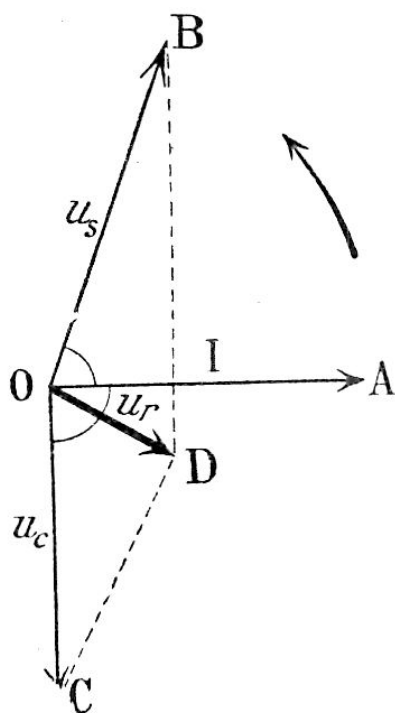


FIG. 25. — Représentation graphique.

Nous avons vu que l'intensité dans une bobine de self-induction était en *retard* sur la différence de potentiel alternative qui existe à ses bornes, dans le cas présent nous en déduirons qu'aux bornes de la bobine de self-induction il existe une force électromotrice u_s que nous représenterons par le vecteur OB faisant un angle BOA avec OA et que nous tracerons en avant de OA (puisque OA doit être en retard sur OB).

En ce qui concerne le condensateur, c'est la même chose... sauf que c'est le contraire : l'intensité est en *avance* de 90° sur la différence de potentiel alternative qui existe à ses bornes.

Donc, la différence de potentiel aux bornes du condensateur C doit être tracée suivant OC perpendiculaire à OA, mais en arrière, de façon que le vecteur OA, représentant l'intensité, soit en avance de 90° sur le vecteur OC de la différence de potentiel.

Considérant les deux vecteurs OB et OC comme des forces et leur appliquant la même construction que précédemment, nous aurons une résultante OD qui pourra avoir une valeur beaucoup plus petite que chacune des composantes OB et OC.

Prenons un exemple pour fixer les idées :

Considérons une bobine de réactance de lampe à arc que nous mettrons en série avec un condensateur électrolytique (1) formé de 18 feuilles d'aluminium de 200 mm. $\times$ 200 mm. et relions le tout aux deux fils d'un réseau à courant alternatif à 110 volts, 50 périodes par seconde, nous notons une intensité de 12 ampères dans l'ensemble, mais n'essayons pas de mettre une lampe de 110 volts aux bornes du condensateur, car nous la grillerons infailliblement, et cependant nous ne disposons, avec les deux fils de notre réseau, que de 110 volts au maximum. Oui, mais en raison des décalages indiqués ci-dessus, il s'établit, aux bornes du condensateur, une différence de potentiel qu'un voltmètre mis à ses bornes nous permet d'évaluer à 180 volts, tandis qu'aux bornes de la self-induction, la différence de potentiel atteint 150 volts. Ainsi donc, l'expérience nous montre une fois encore, qu'en ce qui concerne les différences de potentiel, le courant alternatif ne sait pas mieux faire les additions que précédemment avec les

(1) Voir p. 30.

intensités. Et perplexes, nous resterions stupéfaits devant ce fait d'expérience que 180 volts d'une part, 150 volts d'autre part, sont le résultat de la tension invariable de 110 volts fournie par la distribution d'électricité qui alimente notre installation, si l'explication donnée précédemment à l'aide des vecteurs ne nous avait montré qu'il n'y avait à cela rien que de très naturel.

REMARQUE. — Ces expériences et d'autres qui vont suivre peuvent être facilement réalisées en suivant les indications données à leur sujet dans nos *Manipulations d'Electricité* (Garnier Frères, éditeurs).

CHAPITRE V

Puissance électrique d'un courant alternatif

On sait que dans le cas du courant continu, la puissance électrique absorbée ou fournie par un appareil s'obtient très simplement en faisant le produit de la différence de potentiel en *volts* existant à ses bornes, par l'intensité en *ampères* qui le traverse; le résultat s'exprime en watts, ou en kilowatts s'il s'agit de plus de 1 000 watts. Exemple :

Un tramway électrique gravissant une rampe absorbe 50 ampères, tandis que la différence de potentiel existant à ce moment entre la roulette de la perche du trolley et le rail est de 520 volts; quelle est la puissance absorbée?

Nous avons :

$$P = EI = 520 \text{ v} \times 50 \text{ A} = 26\,000 \text{ watts,} \\ \text{soit } 26 \text{ kilowatts.}$$

Autre exemple : Une grosse lampe à incandescence placée dans la cour d'une usine absorbe 3 ampères sous 110 volts, quelle puissance électrique absorbe-t-elle?

Ici encore :

$$P = EI = 110 \text{ v} \times 3 \text{ A} = 330 \text{ watts.}$$

En une heure, ces 330 watts représenteront un *travail* ou *énergie* de 330 watts-heures, et si le courant nous est facturé à raison de 10 francs le kilowatt-heure, c'est-à-dire les 1000 watts-heures, cette lampe nous coûtera par heure :

$$10 \times 0,33 = 3,30 \text{ fr.}$$

Nous profitons de ce dernier exemple pour insister sur un point trop souvent négligé relatif à la confusion qui existe souvent entre la *puissance* et l'*énergie* ou *travail*.

La puissance est quelque chose dans lequel le temps n'intervient pas : c'est avec du courant continu le produit, à *un instant donné*, de l'indication de l'aiguille de voltmètre par celle de l'ampèremètre; elle s'exprime en watts ou en chevaux, en se rappelant que 736 watts correspondent à un cheval-vapeur.

Le *travail* ou *énergie* est le résultat de la puissance travaillant *pendant un certain temps*; c'est ainsi que la puissance de 330 watts de notre grosse lampe à incandescence maintenue pendant une heure représente une quantité d'énergie électrique de 330 watts-heures que l'on aurait pu traduire en *chevaux-heures* si l'on avait voulu.

Il est donc faux d'évaluer une énergie en watts ou en kilowatts; même si l'on veut abréger, on ne doit jamais oublier de l'exprimer en watts-heures ou en kilowatts-heures, quitte à écrire : W-h, kW-h.

Ceci bien entendu, passons au courant alternatif.

Ce courant, d'allure à première vue désordonnée, va nous réserver encore ici quelques surprises.

1^o Cas d'un courant alternatif traversant une résistance. — Nous avons vu (p. 17) que lorsqu'un courant alternatif parcourt une distance, c'est-à-dire un rhéostat, des lampes à incandescence, etc., l'intensité apparaît en même temps que la différence de

potentiel, contrairement à ce qui arrive avec une self-induction ou une capacité : ou elle est en retard ou en avance.

On exprime la chose en disant que le courant est en phase (c'est-à-dire en concordance de phase) avec la différence de potentiel. Dans ces conditions, si la courbe E (fig. 26) représente les différentes valeurs que prend successivement la différence de potentiel, la courbe de l'intensité I qui lui est semblable s'annulera en même temps que la première et aura ses points maxima aux mêmes instants.

Nous pourrons, comme dans le cas du courant continu, multiplier les valeurs successives de la différence de potentiel par les valeurs correspondantes de l'intensité *au même instant*, ce qui nous permettra de tracer la courbe des variations de la puissance. On voit qu'en partant de zéro la différence de potentiel augmente et l'intensité aussi, le produit ne peut lui aussi qu'augmenter; c'est pour cela que la courbe de la puissance monte rapidement jusqu'à un maximum P_m qui correspond au produit des valeurs maxima de l'intensité et de la différence de potentiel. Puis la différence de potentiel diminue et l'intensité également, la puissance qui représente leur produit diminue de même et s'annule en même temps que l'intensité et la différence de potentiel.

Le courant changeant de sens, la différence de potentiel change aussi de sens, elle augmente mais prend des valeurs négatives; la puissance reste positive parce que le produit de deux quantités négatives est positif (— par — donne +), la courbe de la puissance suit la même allure que précédemment et s'élève à la même valeur maxima P_m pour décroître ensuite, et ainsi de suite. Il n'y a ici aucune difficulté et l'on se trouve en somme dans le cas du courant continu; on peut du reste avoir une idée de la puissance moyenne obtenue en mesurant la

surface hachurée et en la remplaçant par un rectangle équivalent ayant pour base OA, c'est-à-dire la période; le trait pointillé correspond à la puissance moyenne. Pour faire cette opération sans calculs, on pourra découper avec des ciseaux la partie hachurée dessinée à une grande échelle, la mettre sur l'un des plateaux d'une balance sensible que

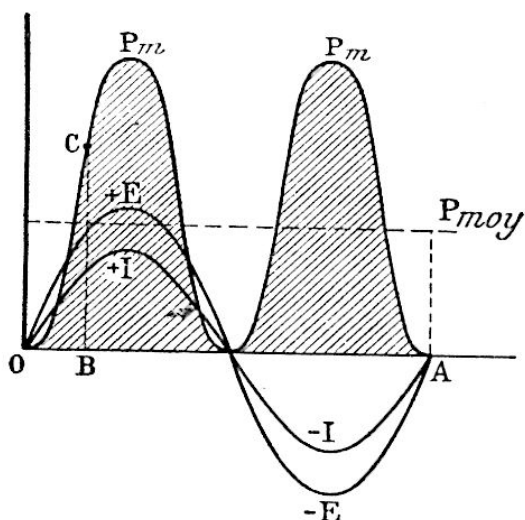


FIG. 26. — Puissance électrique avec courant en phase.

l'on équilibrera avec un rectangle découpé dans le même papier que celui sur lequel on a tracé la courbe de la puissance. Remarquons en passant que la zone hachurée ne représente pas la puissance, mais l'énergie pendant la durée de la période. La puissance passe par une succession de valeurs telles que BC au cours de la période OA qui représente une certaine quantité d'énergie

totalisée par la surface hachurée. C'est bien de l'énergie, puisque c'est de la puissance produite pendant un certain temps; la puissance moyenne est représentée par le côté vertical du rectangle équivalent.

2° Cas du courant alternatif traversant une inductance. — Lorsqu'une bobine d'inductance ou tout autre appareil représentant de la self-induction, tel qu'un primaire de transformateur à vide, est mis en relation avec une canalisation lui fournissant une différence de potentiel alternative, le courant qui s'établit dans la réactance est *en retard* sur la différence de potentiel qui l'a provoqué.

Le phénomène est facile à traduire sous forme graphique (fig. 27). Si E représente la courbe des différentes valeurs de la différence de potentiel existant aux extrémités de la bobine, la courbe I représentant la succession des valeurs de l'intensité du courant dans la bobine ne coïncidera pas avec la première, elle sera retardée d'une certaine valeur OB dépendant des constantes électriques et magnétiques du circuit.

Si nous essayons dans ce cas de tracer comme précédemment la courbe de la puissance, nous y arriverons, quoiqu'un peu plus difficilement que précédemment.

Partons, par exemple, du point B où l'intensité est nulle; à ce moment la différence de potentiel est représentée par BC , mais la puissance est nulle puisque l'on a à faire le produit de BC par une intensité nulle. Continuons; l'intensité croît, la différence de potentiel aussi, la puissance également, puis il y a décroissance comme précédemment, la courbe de la puissance aura la même forme mais ne montera pas si haut que précédemment, parceque, les maxima de E et de I ne coïncidant pas, la puissance sera forcément moins importante. En D la différence de potentiel s'annule, la puissance aussi. Puis la différence de potentiel devient négative, l'intensité restant encore positive à cause de son retard, la puissance devient *négative*, parce que le produit d'une quantité négative par une quantité positive est *négatif* (— par + donne —).

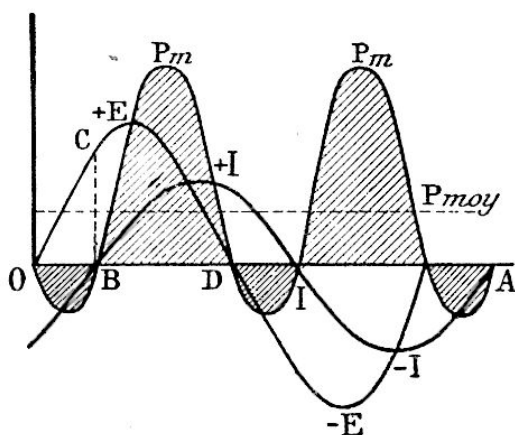


FIG. 27. — Puissance électrique avec courant décalé.

de potentiel décroît, mais ces deux quantités restant positives, leur produit l'est aussi et l'on obtient la zone hachurée AB; en B la différence de potentiel devient nulle la première, ce qui entraîne l'annulation de la puissance, puis la différence de potentiel devient négative tandis que l'intensité est encore positive, leur produit est négatif; la courbe de la puissance passe donc en dessous du zéro comme précédemment, mais d'une quantité plus forte. L'intensité s'annule à son tour en I, et les deux facteurs E et I étant négatifs, leur produit redevient positif, et ainsi de suite.

On obtient finalement les courbes hachurées sur lesquelles il est facile de voir que les valeurs positives et négatives de la puissance *s'équilibrent*; cela revient à dire que la puissance résultante est *nulle*. Tandis que dans le cas précédent il y avait prédominance de la puissance positive sur la puissance négative, il y a, dans le cas d'un retard de 90° , égalité des deux.

Notons qu'il en serait exactement de même dans le cas d'un condensateur; l'intensité était en avance de 90° ou d'un quart de période sur la différence de potentiel, on obtient des courbes de puissance exactement semblables à celles de la figure 28.

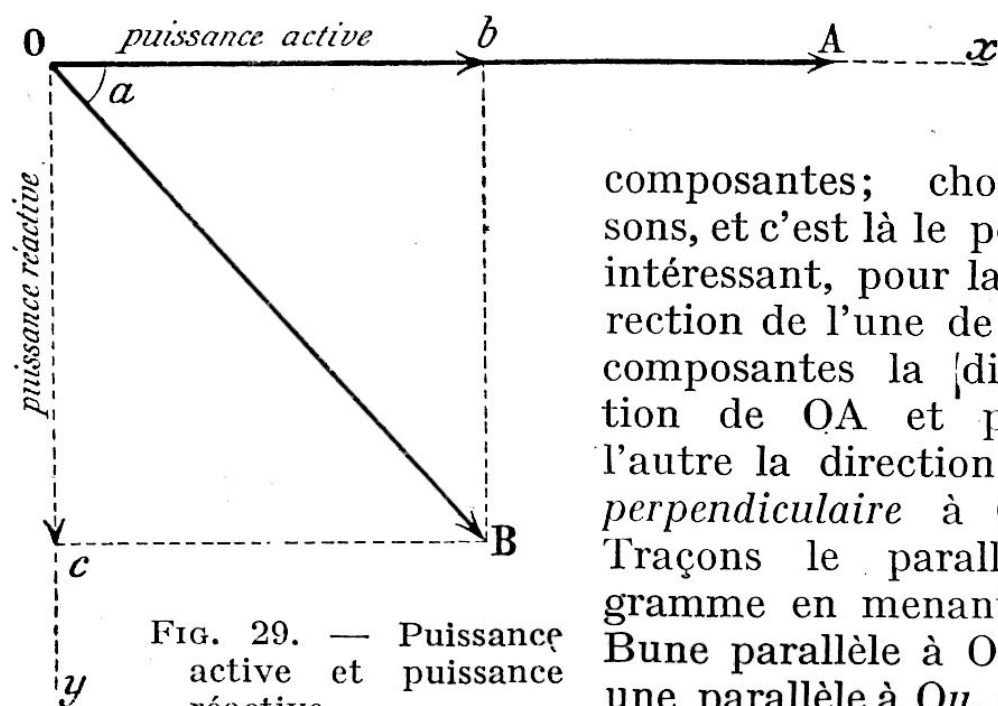
Puissance active et puissance réactive. — Nous avons vu précédemment que dans le cas général où l'intensité est décalée d'un certain angle inférieur à 90° sur la différence de potentiel, l'évaluation de la puissance devenait assez compliquée.

Pour simplifier les calculs on a recours au procédé des vecteurs que nous avons déjà signalé (pp. 17 et 33).

Représentons la différence de potentiel par le vecteur OA (fig. 29) et supposons comme précédemment une rotation dans le sens adopté en trigonométrie, c'est-à-dire en sens inverse des aiguilles d'une

montre. L'intensité étant en retard d'un certain angle a , traçons le vecteur OB en dessous de OA et faisant avec lui un angle $AOB = a$. Prenons la longueur du vecteur OB proportionnelle à la valeur de l'intensité, de même que OA aura une longueur proportionnelle à la différence de potentiel atteinte par le courant.

Nous savons que nous pouvons considérer OB comme une force que nous décomposerons en deux



composantes; choisissons, et c'est là le point intéressant, pour la direction de l'une de ces composantes la direction de OA et pour l'autre la direction Oy perpendiculaire à OA . Traçons le parallélogramme en menant de B une parallèle à Ox et une parallèle à Oy , cela nous détermine les deux composantes Ob et Oc .

Ainsi donc, cette construction géométrique que nous avons parfaitement le droit de faire va nous décomposer notre intensité de courant OB en deux, ou, si l'on veut, le courant I représenté par OB pourra être considéré comme la résultante de deux courants, l'un Ob en phase avec OA , c'est-à-dire avec la différence de potentiel, l'autre Oc perpendiculaire à OA ou à 90° ou encore en *quadrature* avec OA .

Mais nous connaissons le résultat en ce qui concerne la puissance électrique dans ces deux cas :

Avec le premier cas (fig. 26) où le courant est en phase avec la différence de potentiel, la puissance est à chaque instant représentée par le produit de la différence de potentiel par la valeur correspondante de l'intensité; la puissance est entièrement positive, *réelle*, ou si l'on veut, c'est de la *puissance active*, c'est le cas d'un courant traversant une résistance.

Dans le second cas, où le courant est en retard de 90° sur la différence de potentiel (fig. 27), on a vu qu'il y avait autant de puissance positive que de puissance négative, c'est-à-dire finalement une puissance nulle. C'est le cas d'un courant travaillant sur une self-induction ou réactance parfaite; on l'appelle pour cela *puissance réactive*.

Les électriciens emploient dans leur *argot* deux expressions que nous citerons sans les recommander, car, il faut bien l'avouer, Il y a un certain langage qui pour n'être pas officiellement reconnu n'en est pas moins répandu; on entend en effet désigner la première puissance, celle que nous appelons *active*, par l'expression de puissance *wattée*; l'autre qui est nulle et sans watts apparents est appelée puissance *déwattée*. Mais, de même que nous nous sommes prudemment abstenus de parler de *voltage* quand il s'est agi de tension ou de différence de potentiel, nous ne dirons pas non plus *ampérage* pour intensité et encore moins *ohmage* pour résistance! Il est si facile de parler correctement et de ne pas mêler le nom des unités aux quantités elles-mêmes, que nous éviterons toujours de telles expressions qui devraient être abandonnés. On peut s'exprimer clairement sans s'en servir, c'est ce que nous ferons.

Il résulte de ce que nous venons de voir, que, dans le cas général qui se présente dans la pratique des courants alternatifs où l'intensité n'est pas en phase avec la différence de potentiel, mais se trouve plus ou moins décalée sur cette différence de poten-

tiel, on peut, par la décomposition de cette intensité en deux composantes, traiter le problème en deux parties. On fait alors comme si l'on se trouvait en présence de deux courants : l'un en phase, l'autre en quadrature avec la différence de potentiel, le premier mettant en jeu de la puissance *active* ou *réelle*, l'autre de la puissance *réactive* ou *fictive*.

Reste à déterminer les valeurs de ces composantes, connaissant I et l'angle AOB que fait I avec la différence de potentiel (fig. 29); ici quelques rappels de notions de mécanique et de mathématiques élémentaires seront nécessaires : c'est ce que nous nous proposons de faire dans un prochain chapitre.

Avant d'aller plus loin, on peut se demander comment on peut tracer ces courbes de courant et mesurer leur décalage, étant donné que les courants alternatifs industriels changent de sens 50 et même quelquefois 100 fois par seconde. Nous allons ouvrir ici une parenthèse et montrer comment on y est arrivé afin de ne pas laisser planer une incertitude et pour montrer que la base sur laquelle sont édifiées nos hypothèses est parfaitement solide et réelle : c'est ce que l'expérience va nous permettre de vérifier.

REMARQUE. — La puissance réelle ou puissance active s'évalue en *watts* ; la puissance magnétisante ou réactive s'évalue en *vars* (abréviation de volts-ampères-réactifs), enfin la puissance apparente qui est la résultante des deux premières s'évalue en *volts-ampères*.

CHAPITRE VI

Mesure des courants alternatifs

Tracé des courbes des courants alternatifs. — Nous avons supposé jusqu'ici qu'il existait un observateur assez habile pour suivre le courant alternatif dans ses différentes variations, et les courbes que nous avons indiquées, pages 14 et suivantes, représenteraient le résultat graphique des variations successives du courant soigneusement enregistrées par l'observateur en question.

En réalité, il serait extrêmement difficile à un observateur de suivre ces fluctuations si l'on songe que les courants alternatifs industriels croissent et décroissent près de 100 fois *par seconde*. On est arrivé cependant à enregistrer très exactement ces variations à l'aide d'appareils très ingénieux dont nous allons indiquer le principe.

1^o Méthode de Joubert. — *Tracé de la courbe par points.* — Pour bien comprendre le fonctionnement de ces appareils, nous décrirons d'abord un procédé simple indiqué par M. Joubert en 1889, pour étudier la force électromotrice des alternateurs, c'est-à-dire des machines qui produisent du courant alternatif.

Supposons que l'arbre d'une de ces machines

(fig. 30) soit prolongé en dehors des paliers de façon à pouvoir fixer dessus un collecteur C de forme spéciale. Ce collecteur pourra être constitué par un cylindre isolant en buis ou en ébonite sur la moitié duquel on aura emmanché un tube de laiton portant une languette de ce même métal *e*. Un porte-balai

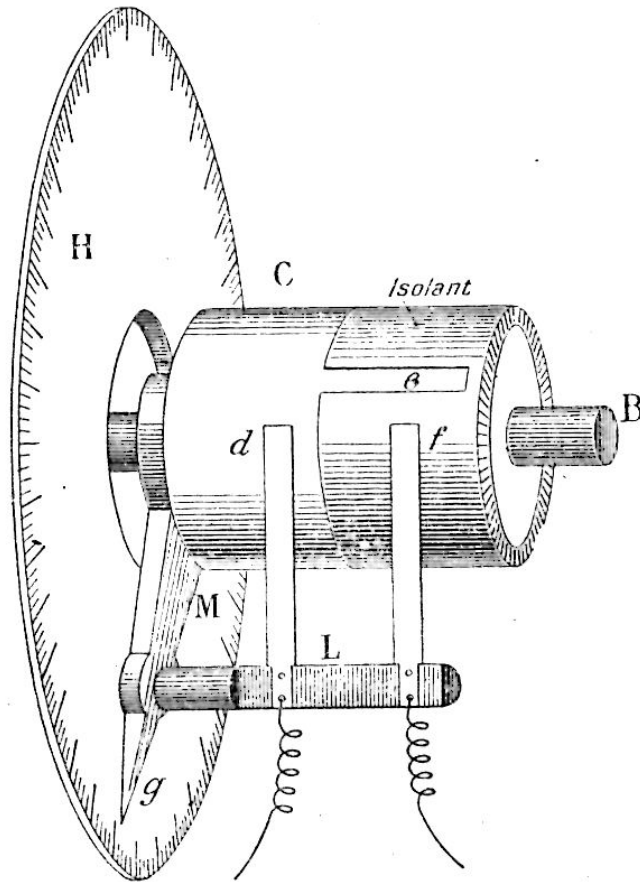


FIG. 30. — Appareil permettant de relever les courbes des courants alternatifs.

M sur lequel seront fixées, par l'intermédiaire d'une barre isolante L, deux lames souples de laiton battu *d* et *f* pourra décrire à la main un cercle complet autour du collecteur en suivant un cadran gradué en 360 degrés par exemple. Une vis de pression permettra d'immobiliser le porte-balai dans telle ou telle position que l'on voudra.

Ceci posé, mettons l'alternateur en marche, le

collecteur tournera avec l'arbre et à chaque tour la languette métallique *e* réunira le balai *f* au balai *d*. Introduisons ces deux lames dans le circuit de l'alternateur en interposant un voltmètre à cadre mobile à courant continu avec zéro au milieu. (Si l'alternateur donnait une tension trop élevée, on interposerait une résistance.) Déplaçons le porte-balai *M* lentement le long du cercle gradué *H* en lui faisant décrire un cercle complet, quelle ne sera pas notre surprise de voir le voltmètre à courant continu partir de zéro, aller jusqu'à un maximum positif, revenir au zéro, atteindre un nouveau maximum, mais négatif cette fois, et ainsi de suite, c'est-à-dire passer par toutes les valeurs successives du courant alternatif !

L'explication se devine : partons du moment où le voltmètre marque zéro, cela veut dire que la languette *e* ferme le circuit du voltmètre sur l'alternateur au moment précis où le courant est nul ; ce moment existe, c'est celui où le courant va changer de sens, puis, à mesure que nous manœuvrons le porte-balai *M*, nous déplaçons les balais *d* et *f* le long du collecteur en mouvement. Le contact entre les balais *d* et *f* s'établit un peu plus tard quand le courant alternatif a commencé à croître dans un sens et le voltmètre enregistre la valeur du courant à ce moment. Il est à remarquer qu'il ne peut dévier beaucoup si l'angle dont on a tourné le porte-balai *M* est faible, parce que la languette, étant très mince, n'établit le contact que pendant un temps très court. Si nous représentons (fig. 31) la courbe du courant alternatif en « supposant le problème résolu », comme l'on fait souvent en mathématiques, nous voyons que si *O* est le point de départ, c'est-à-dire celui qui correspond au moment où le courant est nul, pour un déplacement de la manette *M* de quelques degrés que nous représenterons par *Oa*, nous aurons une force électromotrice

ab. Tournons la manette M d'un nouvel angle égal au premier qui sera représenté par Oc , nous aurons une nouvelle déviation du voltmètre plus grande que la première qui correspondra à cd et ainsi de suite :

En somme, si nous voulons tracer la courbe du courant par cette méthode, il nous suffira de choisir un papier quadrillé sur lequel nous tracerons (fig. 31) une ligne horizontale Ox sur laquelle nous prendrons une longueur de 360 millimètres par exemple, puis amenant le porte-balai M sur le point donnant zéro

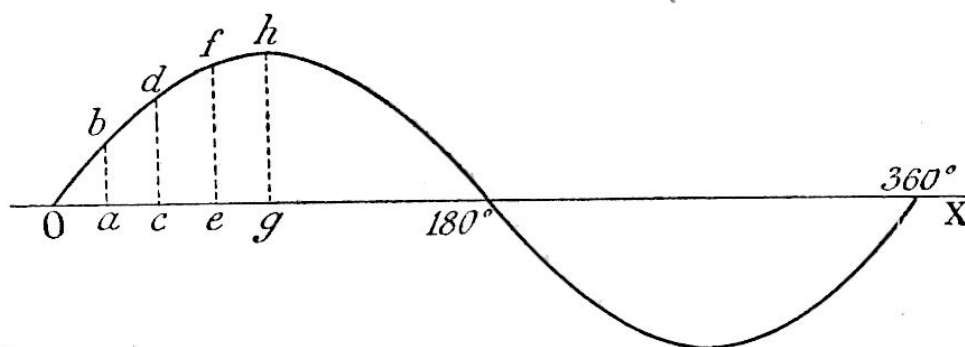


FIG. 31. — Tracé de la courbe par points.

au volt-mètres, qui sera le point de départ, nous avancerons ce porte-balai de 10 degrés par exemple le long du cercle gradué et nous noterons l'indication correspondante du voltmètre, 5 volts par exemple. Sur notre papier quadrillé nous porterons sur la ligne Ox , à 10 millimètres de O , une longueur ab de 5 millimètres perpendiculaire à Ox , puis nous avancerons M de dix nouveaux degrés, ce qui nous mettra à 20 millimètres du point O et pour ce nouveau point le voltmètre nous indiquera un certain nombre de volts que nous porterons perpendiculairement à Ox , nous aurons le point d et ainsi de suite; on arrivera ainsi, avec un peu de patience, à tracer la courbe complète du courant, en fonction du temps, mais il y a mieux comme on va le voir.

Au lieu de faire du dessin graphique, confions ce soin à l'appareil, c'est ce que réalise l'ondographe Hospitalier qui trace lui-même les courbes du courant.

Pour n'avoir pas à déplacer à la main le porte-balai M, ce qui est ennuyeux, il est facile de voir que l'on peut imaginer un dispositif d'engrenages démultiplicateurs commandés par l'arbre même de l'alternateur, faisant tourner lentement le porte-balai M en même temps qu'un tambour d'enregistreur sur lequel l'aiguille du voltmètre, terminée par une plume comme dans les voltmètres et ampèremètres enregistreurs viendra tracer la courbe du courant alternatif.

2^o Oscillographe de Blondel. — Tandis que la méthode de Joubert permet d'enregistrer des courbes correspondant à des courants qui ne varient pas au cours de la mesure, l'oscillographe de Blondel plus scientifique suit constamment les variations de ce courant, ce qui permet de voir des perturbations passagères telles que des surtensions, etc. Pour y arriver, Blondel a pris un galvanomètre extrêmement léger dans sa partie mobile, de façon à ce que cette dernière puisse suivre aisément toutes les variations du courant alternatif; la partie fixe peut être aussi lourde qu'on le voudra puisqu'elle ne participe pas aux oscillations.

En principe, l'oscillographe de Blondel se compose d'un aimant (fig. 32) ou d'un électro-aimant très puissant produisant un champ magnétique intense que deux pièces polaires en fer doux C et D concentrent sur deux fils très fins *a*, *b* convenablement tendus, dans lesquels circule le courant alternatif à examiner.

On reconnaît ici la disposition générale des appareils de mesure, dits à cadre mobile, employés avec le

courant continu (1); mais, tandis que la bobine mobile qui se trouve entre les pôles de l'aimant serait trop lourde, disons trop inerte, pour suivre les variations si rapides du courant alternatif, les deux fils *a* et *b* tendus de l'oscillographe de Blondel constituent également une bobine formée d'une spire (le courant descendant dans un des fils et remontant dans l'autre), mais beaucoup plus légère, surtout si l'on prend des fils de quelques centièmes

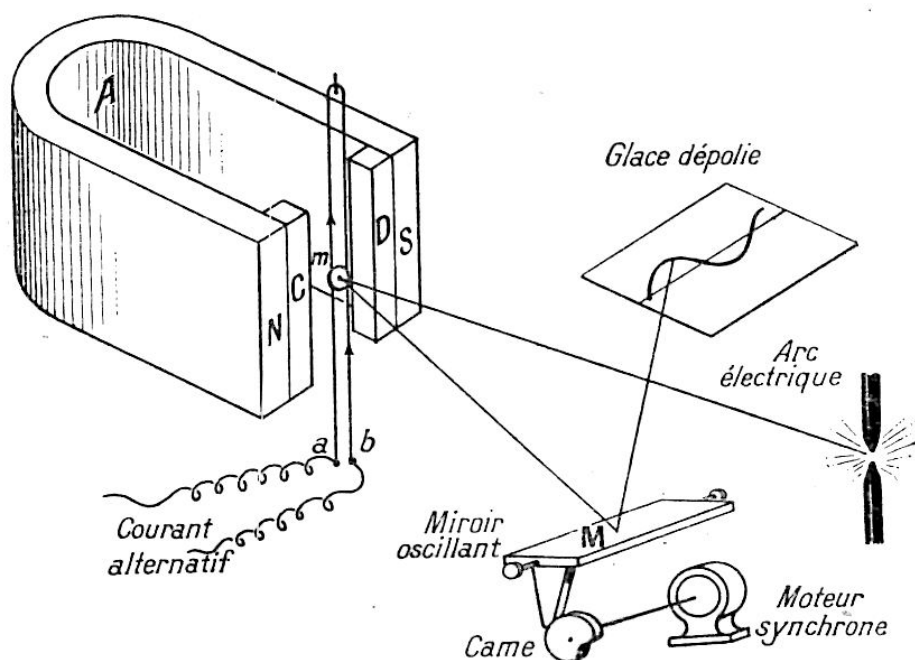


Fig. 32. — Oscillographe bifilaire à miroir de Blondel.

de millimètre de diamètre. Il en résulte que ces fils oscillent mieux et plus rapidement que ne le feraient les cadres mobiles des appareils industriels, et le miroir qu'ils supportent pourra répéter fidèlement ces oscillations. Ce miroir *m* est lui-même extrêmement léger si l'on songe qu'il a à peine un *demi-millimètre* de côté ! Pour obtenir la courbe du courant, il suffit de faire tomber un rayon lumineux provenant d'un arc électrique sur ce petit miroir et de

(1) Voir les *Installations électriques*, par A. SOULIER, p. 135.

le renvoyer sur un autre miroir tournant M mû par un mouvement d'horlogerie ou par un petit moteur synchrone. On observe alors sur une glace dépolie la courbe du courant (1) qui est lumineuse et comme produite par un trait de feu.

On peut la photographier si l'on désire en conserver une trace durable. L'appareil de Blondel, dont nous venons d'indiquer le principe, est un appareil scientifique de grande valeur, car il permet d'analyser les phénomènes qui se passent lorsqu'on établit le courant dans un transformateur ou quand on le coupe, en montant simplement à la place de la glace dépolie un châssis dans lequel on fait défiler une pellicule sensible, comme si l'on voulait prendre une vue au cinématographe. Une fois développée, la pellicule révèle à l'œil des déformations de courbes ou des phénomènes qui auraient pu sans cela passer inaperçus.

3^o Oscillographe cathodique. — L'oscillographe de Blondel, instrument extrêmement précieux dans l'étude des courants variables a été utilisé en cinématographie sonore pour enregistrer sur pellicule la voix et la musique, son petit miroir recevant par les 2 fils, qui le supportent les oscillations produites par le passage du courant convenablement amplifié en provenance d'un microphone. Le rayon lumineux oscillant est envoyé sur une pellicule cinématographique et vient l'impressionner à côté de l'image photographique. On a ainsi sur la même bande

(1) On a bien la courbe du courant, puisque le petit miroir manœuvré par les deux fils donne un déplacement du rayon lumineux proportionnel au *courant* et que le miroir tournant, mû par le moteur synchrone, lui communique un déplacement perpendiculaire proportionnel au *temps*. Le trait lumineux qui se produit sur la glace dépolie représente donc bien les variations du courant en fonction du temps.

l'image et le son. On a pu obtenir ainsi l'enregistrement de sons correspondant à des fréquences de quelques périodes par seconde jusqu'à 7 ou 8 000 p : S (sifflets très aigus, voix d'enfants, etc). Au de là l'enregistrement se fait mal à cause de l'inertie de l'équipage mobile. Il y a lieu de remarquer ici que les 2 fils et le miroir qu'ils supportent baignent dans une huile servant à amortir les oscillations.

Pour des fréquences plus élevées, en particulier pour la télévision on a été conduit à utiliser l'oscil-

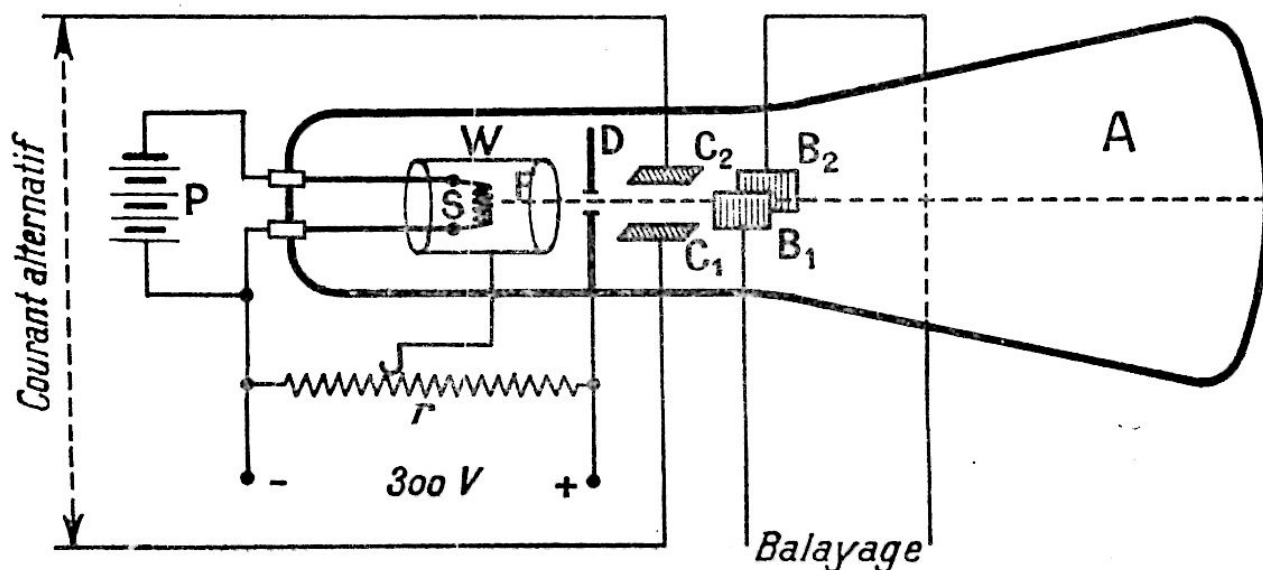


Fig. 33. — Coupe de l'oscillographe cathodique.

lographe cathodique mettant en jeu un rayon cathodique, sans poids, qui oscille à toutes les fréquences et qui constitue un instrument remarquable.

En principe l'oscillographe cathodique est constitué par une ampoule A (fig. 33) d'une forme un peu spéciale dans laquelle on a fait un vide aussi complet que possible et au fond de laquelle se trouve une petite spirale de tungstène S que l'on peut rendre incandescente au moyen d'un courant électrique en provenance d'une batterie d'accumulateur P, c'est ce qu'on appelle la cathode. A une certaine distance,

devant cette cathode, est disposé un diaphragme D servant d'anode et qui pour cela est en relation avec le pôle positif d'une source de courant continu dont le pôle négatif est en communication avec le filament ou cathode.

Quand la spirale S est suffisamment portée à l'incandescence elle émet des électrons (comme dans les tubes à plusieurs électrodes (1) employés en T. S. F. Ceux-ci attirés par l'anode prennent une vitesse croissante qui leur fait dépasser le but c'est-à-dire l'anode D et continuent leur chemin en ligne droite dans le tube. Afin de mieux concentrer ce faisceau d'électrons on a prévu un manchon métallique W ou cylindre de Wehnelt relié à un point convenable d'une grande résistance r qui agit comme potentiomètre (2). Ce manchon condense les électrons divergents et en fait un faisceau très mince qui vient bombarder le fond de l'ampoule. Ce fond étant enduit d'un produit : le *tungstate de calcium* devient lumineux à l'endroit où arrive le faisceau d'électrons. On conçoit donc que si le faisceau se déplace la tache lumineuse ou le « spot » se déplace à son tour et on pourra suivre ce déplacement.

Or le faisceau ainsi réalisé se déplace instantanément sous l'action de charges électriques, si donc on a disposé dans le tube parallèlement à son passage deux plaques C_1 et C_2 reliées à la source de courant à étudier, le faisceau d'électrons sera attiré par une de ces plaques et repoussé par l'autre suivant que ces plaques seront positives ou négatives. Nous aurons ainsi le mouvement de va et vient que les 2 fils de l'oscillographe de Blondel communiquait à son miroir. D'autre part, quelques centimètres

(1) Voir *Les Manipulations d'Électricité*, par A. SOULIER. Éditions Garnier, p. 383 et suivantes.

(2) *Id.* p. 342.

après le faisceau oscillant passe entre deux autres plaques B_1 et B_2 disposées perpendiculairement aux premières C_1 et C_2 et en communication avec une tension périodique, dite de *balayage*, dont la fréquence est celle du courant à étudier ou un de ses sous-multiples et qui fera dévier le faisceau proportionnellement au temps, ce sera l'équivalent du miroir oscillant de l'oscillographe de Blondel. On verra apparaître sur le fond du tube la courbe du courant puisque le faisceau et le spot qui le caractérise oscille en suivant les variations de courant que lui communiquent les plaques C_1 et C_2 tandis qu'il est déplacé proportionnellement au temps par les plaques B_1 et B_2 , on a donc bien la courbe du courant en fonction du temps.

Cet appareil peut ainsi enregistrer des courants de fréquences extrêmement élevées, plusieurs millions de périodes par seconde, tels que ceux de la foudre, c'est l'instrument de recherches scientifiques par excellence, c'est lui qui est à la base de la télévision.

Intensité de courant efficace et différence de potentiel efficace. — On ne peut songer industriellement à employer les appareils ci-dessus pour mesurer l'intensité d'un courant alternatif ou sa différence de potentiel, quoique ce soit possible à la rigueur, en utilisant les diagrammes ci-dessus comme nous le verrons.

Et d'abord, qu'entend-on par intensité ou différence de potentiel d'un courant constamment variable? Quelques précisions, on le devine, sont ici nécessaires.

Les courants alternatifs et les courants continus ont certaines propriétés qui leur sont communes; ainsi, par exemple, ils échauffent un fil conducteur de la même façon, car il est bien évident que l'échauffement d'un câble par un courant électrique est

indépendant du sens du courant qui le traverse.

Prenons un fil fin, faisons-le traverser d'abord par un courant continu; il va s'échauffer et se dilater, il s'allongera et la mesure de cet allongement nous donnera un certain chiffre correspondant à l'intensité du courant qui traverse ce fil. Nous savons mesurer cette intensité du courant, puisque c'est du courant continu, par un dépôt d'argent par exemple (1), ou simplement en intercalant un ampèremètre à cadre mobile convenablement étalonné.

Remplaçons le courant continu par un courant alternatif, l'ampèremètre à cadre mobile ne nous donnera aucune indication, pas plus que le dépôt d'argent qui ne se fera pas, parce que l'action d'un des courants est détruite immédiatement par le courant inverse; mais le fil, lui, s'échauffera pour si nombreuses que se succèdent, chaque seconde, les *alternances*, c'est-à-dire les poussées positives ou négatives du courant, et s'échauffant il se dilate. La mesure de son allongement nous donnera une indication sur l'intensité *efficace* du courant alternatif qui le traverse, c'est-à-dire celle qui nous intéresse; ce sera l'intensité du courant qui a la même efficacité que le courant continu.

Or, nous avons taré notre fil chaud avec le courant continu que nous savons mesurer; si, avec le courant alternatif, nous trouvons le même allongement, nous dirons que l'intensité *efficace* de ce courant alternatif a pour valeur le chiffre que marque l'ampèremètre, lorsqu'il est traversé par un courant continu produisant sur le fil le même effet.

Et voilà! C'est en somme assez simple puisqu'il existe dans l'industrie des ampèremètres dits « ther-

(1) Voir *Leçons pratiques d'électricité industrielle. Le courant continu*, par A. SOULIER, p. 89.

miques » ou à fil chaud basés sur l'échauffement d'un fil fin sous l'effet du courant, l'enregistrement des allongements étant assuré par une aiguille se déplaçant sur un cadran. Il suffira de tarer ou d'étalonner cet appareil avec du courant continu, par exemple et un ampèremètre à courant continu, pour avoir ensuite les intensités efficaces de tout courant alternatif que l'on voudra.

Il en est naturellement de même pour la différence de potentiel, et nous dirons que la *valeur efficace d'une force électromotrice alternative* est la même que celle d'une force électromotrice continue et constante qui, appliquée à un circuit présentant une simple résistance ohmique (fil fin de voltmètre thermique), produit dans le même laps de temps les mêmes effets thermiques, électrodynamiques, etc.

Nous avons dit plus haut qu'à l'aide des diagrammes fournis par l'ondographe ou l'oscillographe, on pouvait déterminer l'intensité ou la différence de potentiel d'un courant alternatif.

Nous voyons tout de suite que la mesure au double décimètre, par exemple, des valeurs maxima et minima sera possible, de telle sorte qu'en tarant les déviations de l'appareil avec du courant continu, on pourra avoir avec une certaine approximation la valeur en *ampères* ou en *volts* de ces maxima. Mais il faut faire attention, les valeurs *maxima* ainsi relevées *ne sont pas* les valeurs *efficaces* et cela se comprend très bien.

Le courant n'est maxima que pendant un temps très court, il passe avant et après par des valeurs moindres, il s'annule même, et pendant ce temps la chaleur dégagée dans les conducteurs qu'il traverse est, soit nulle (aux passages à zéro), soit toujours plus faible que celle que procurerait la valeur maxima si elle était tout le temps appliquée.

Il faudra donc affecter cette valeur maxima d'un

certain coefficient, tenant compte de ces variations, et l'on comprend très bien que ce coefficient dépendra beaucoup de la forme de la courbe du courant. Un courant à courbe carrée dégagera pendant un même temps, dans un fil, plus de chaleur qu'un courant à courbe pointue (comme celui des magnétos) qui aurait les mêmes valeurs maxima. La surface de la courbe entre donc en ligne de compte dans l'évaluation de ce coefficient.

Les mathématiques nous permettent d'évaluer facilement une surface quelconque ; en particulier lorsqu'on connaît l'équation de la courbe qui limite cette surface, l'opération s'appelle une intégration et elle tiendrait ici en quelques lignes. Nous préférons indiquer une méthode simple quoique moins précise, mais dans le développement de laquelle tout le monde pourra nous suivre.

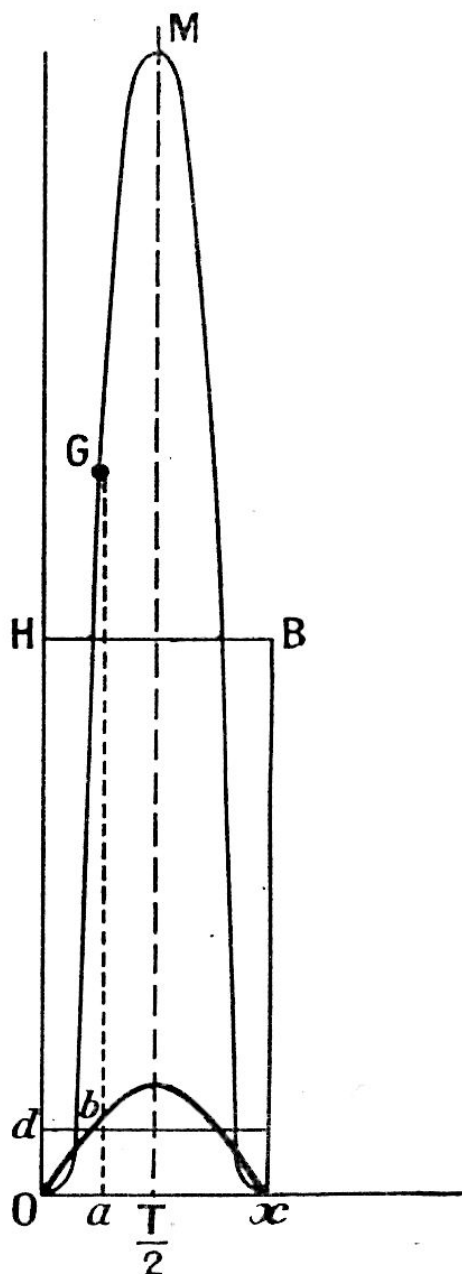


FIG. 34. — Détermination de la valeur efficace d'un courant alternatif.

Détermination graphique des valeurs efficaces. — Supposons qu'un oscillographe nous ait donné (fig. 34) la courbe représentative de l'intensité d'un courant alternatif traversant une résistance R qu'il chauffe. Construisons,

au-dessus de cette courbe, la courbe des *carrés* de l'intensité, en mesurant une série de valeurs de l'intensité telles que *ab* aussi rapprochées que possible et en multipliant le nombre trouvé par lui-même, ce qui donne la valeur *AG* et le point *G* de la nouvelle courbe. Cette courbe correspond à la puissance mise en jeu RI^2 et la surface qu'elle englobe représente l'énergie, c'est-à-dire l'échauffement de la résistance *R*.

Découpons avec des ciseaux la courbe *oMx*, pesons-la avec une balance de précision, ou plutôt équilibrons-la avec un rectangle découpé dans le même papier ayant pour une de ses bases la longueur *ox*. Ce rectangle *équivalent*, c'est-à-dire ayant la même surface, puisque même poids, aura comme hauteur *oH* dont la racine carrée *od* nous donnera la valeur de l'intensité efficace cherchée.

En effet, cette racine carrée *od* représente bien l'intensité d'un courant continu *I* qui produirait, pendant le temps $T/2$ représenté par *ox* (*T* étant la durée d'une période complète correspondant à deux alternances), le même effet que le courant alternatif.

Sur la résistance *R* que nous supposons la même dans les deux cas, le courant continu en question dégagera une quantité de chaleur ayant pour valeur RI^2t (1), c'est-à-dire dans le cas actuel par

$$R \times I^2 \times \frac{T}{2}$$

ou, puisque *R* est constant, la quantité de chaleur sera proportionnelle à $I^2 \times T/2$.

Or, cette dernière valeur n'est autre que la surface du grand rectangle *oHBx* (construit avec *oH* carré de *od* comme l'un des côtés et *ox* = $t = \frac{T}{2}$ pour

(1) Voir *Le courant continu*, par A. SOULIER, p. 70.

l'autre). oH représentant I^2 , od qui en est la racine carrée correspondra à I .

Or, la surface du rectangle $oHBx$ est la même que celle enveloppée par la grande courbe oMx qui correspond à l'échauffement produit par le courant alternatif pendant le même temps. Donc, od représente bien l'intensité efficace. Sur un dessin parfaitement établi et à une échelle suffisante, en faisant le rapport qui existe entre od et la valeur maxima de l'intensité, on trouve dans le cas d'une courbe sinusoïdale, ce qui est le cas général des courants alternatifs :

$I_{\max} = 1,414 I_{\text{eff}}$, c'est-à-dire $I_{\max} = I_{\text{eff}} \sqrt{2}$,
puisque $\sqrt{2} = 1,414$, d'où :

$$I_{\text{eff}} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}.$$

On voit donc que l'on commettrait une erreur grossière, comme cela arrive malheureusement assez souvent, en disant que l'intensité qui nous intéresse est l'intensité moyenne (1). *L'intensité moyenne* $\left(\frac{2}{\pi} I_{\max}\right)$ ne doit jamais être confondue avec l'*intensité efficace*, la seule vraiment importante qui est, nous ne saurions trop le répéter :

$$I_{\text{eff}} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}.$$

Ce que nous avons dit de l'intensité se répète pour la différence de potentiel.

EXEMPLE. — Dans une maison reliée à une usine produisant du courant alternatif, nous voulons connaître la valeur maxima du courant alternatif qui

(1) Bien que théoriquement l'intensité moyenne produite par un courant périodique soit nulle on désigne par intensité moyenne la valeur $\frac{2}{\pi} I_{\max}$ soit $0,636 I_{\max}$.

alimente les lampes. Nous installons un voltmètre thermique que nous relions aux deux fils de la canalisation, et nous lisons 120 volts.

Ce chiffre de 120 volts correspond évidemment à la différence de potentiel efficace; c'est à ce même point que viendrait l'aiguille si l'on avait du courant continu fourni par 60 éléments d'accumulateurs en série marquant 2 volts chacun. Mais si $E_{\text{eff}} = 120$ volts, nous savons que :

$$E_{\text{max}} = E_{\text{eff}} \sqrt{2}, \text{ c'est-à-dire : } E_{\text{eff}} = 120 \times 1,414 \\ = 169,6 \text{ volts.}$$

Ainsi donc, à certains moments, lors des passages au maxima et au minima, il y a près de 170 volts entre nos deux fils.

Cette simple expérience explique bien des choses :

Il arrive parfois, sur les canalisations à haute tension, qu'un isolateur *claque* (c'est le mot) pour une tension efficace bien inférieure à celle avec laquelle il a été essayé en usine.

Cela tient à ce que, au moment des maxima ou des minima, la différence de potentiel atteint des valeurs assez élevées. C'est ainsi qu'un isolateur prévu pour une tension de 20 000 volts efficaces sera soumis au moment des maxima et minima à $20\,000 \times 1,414 = 28\,280$ volts.

C'est une des nombreuses surprises que nous procure le courant alternatif et ce n'est pas la dernière, comme on le verra plus loin.

La morale de tout ceci, c'est que, quoique ce ne soient que les valeurs efficaces qui nous intéressent, il faut se méfier des *pointes*, c'est-à-dire des valeurs maxima et minima du courant alternatif. Ce sont ces pointes qui le plus souvent « percent » les isolants. C'est une façon imagée de parler, mais qui n'en est pas moins exacte.

Les voltmètres et ampèremètres thermiques ne

sont pas les seuls instruments que l'on peut employer pour la mesure des valeurs efficaces des courants alternatifs.

Les appareils dits à *fer doux*, formés d'une bobine parcourue par le courant alternatif dans l'intérieur de laquelle se déplace un morceau de fer doux, conviennent très bien, mais tandis que les appareils thermiques sont exacts avec des courants d'une fréquence quelconque, c'est-à-dire dont les changements de sens sont plus ou moins espacés, les appareils à fer doux ne vont bien que pour la fréquence avec laquelle on les a étalonnés.

De même, on peut employer des *électrodynamomètres*, c'est-à-dire des appareils à cadre mobile dont l'aimant a été remplacé par une bobine alimentée par le même courant qui traverse le cadre. Le type de ces appareils est la balance de Lord Kelvin.

Enfin, comme voltmètre, on peut employer les électromètres, lesquels, une fois tarés ou étalonnés sur du courant continu, conviennent très bien au courant alternatif. D'excellents électromètres de ce genre ont également été établis par Lord Kelvin; ils constituent avec la balance de même nom de très bons étalons, car ils ne contiennent aucun élément susceptible de varier avec le temps.

Mesure de la puissance des courants alternatifs. — Il ne faudrait pas croire que, puisque nous disposons de bons voltmètres et de bons ampèremètres à courant alternatif, il soit facile de mesurer la puissance absorbée rien qu'en faisant, comme avec le courant continu, le produit des indications du voltmètre par celles de l'ampèremètre. Bien entendu, rien ne nous empêche de faire ce produit, nous aurons ainsi la *puissance apparente* qui n'est pas toujours la *puissance réelle*, ainsi qu'il est facile de s'en rendre compte.

Prenons un moteur à courant alternatif relié à un réseau à courant alternatif à travers un de ces excellents compteurs électriques que nous installent avec empressement toutes les compagnies d'électricité. Introduisons un ampèremètre thermique dans le circuit, mettons un voltmètre thermique entre les bornes, et, une fois le moteur en marche et à un régime constant, observons pendant une heure les trois appareils : *compteur, ampèremètre, voltmètre*.

Au bout d'une heure, le compteur gradué en *watts-heure* aura avancé par exemple de 1440 divisions, soit 1440 watts-heure, c'est-à-dire 1440 watts pendant une heure. C'est donc que la puissance s'est maintenue à 1.440 watts en moyenne.

Pendant tout ce temps, le voltmètre a accusé 120 volts efficaces et l'ampèremètre 15 ampères efficaces. Si nous faisons le produit des deux, nous trouvons 1800 watts !

Il y a là un grave désaccord qui aura tendance à nous enchanter, car nous croirons y voir un retard notable des indications du compteur. Cependant il n'y a pas d'illusions à se faire, car les compagnies d'électricité sont assez soucieuses de leurs intérêts pour s'éviter de tels mécomptes. Les compteurs électriques sont exacts, beaucoup plus peut-être que leurs camarades les compteurs à gaz ; ce qui ne l'est pas, c'est l'emploi d'un voltmètre et d'un ampèremètre pour évaluer la puissance réelle en courant alternatif.

Notons en passant que si, au lieu de faire marcher notre moteur, nous allumons un nombre de lampes à incandescence suffisant pour que l'ampèremètre marque 12 ampères, toujours avec 120 volts, nous aurons la surprise de voir notre compteur redevenir exact et marquer au bout d'une heure, 1440 watts-heure, chiffre correspondant à la puissance constante de 1440 watts marquée par le voltmètre et l'ampèremètre.

D'où vient la différence de fonctionnement? C'est dans la self-induction qu'il faut la rechercher. En effet, les lampes sont des résistances sans self-induction, le moteur est au contraire constitué par des bobines entourant du fer, et dans ces bobines circule le courant alternatif.

Il se produit dans ce dernier cas, nous le savons, un *retard* de l'intensité sur la force électromotrice, et nous avons vu (p. 45) que dans ce cas l'on a tantôt de la puissance positive et tantôt de la puissance négative qui se retranche de la première.

Il en résulte que la puissance réelle ou active est bien *plus petite* que la puissance apparente provenant du produit brutal de l'intensité efficace par la différence de potentiel efficace. Comme conclusion, nous devons nous abstenir de mesurer la puissance en courant alternatif à l'aide d'un voltmètre et d'un ampèremètre, comme on le fait avec du courant continu (sauf les cas spéciaux où l'on n'a que des résistances pures : lampes à incandescence, rhéostats, etc.).

Nous emploierons des appareils analogues aux compteurs, c'est-à-dire des *wattmètres* formés généralement d'un circuit à gros fil dans lequel circule le courant total, les « ampères », et dans le voisinage un circuit mobile à fil fin (1) ou circuit des « volts ». Il y a attraction entre ces deux circuits et déviation d'une aiguille attachée au cadre mobile, à une condition toutefois, c'est que les courants soient de même sens : dès qu'ils sont de sens inverse ils se repoussent, c'est une loi de la physique facile à démontrer du reste avec des courants continus.

Si donc on a une intensité en retard sur la différence de potentiel (fig. 27), on voit que pendant un certain temps, lorsque les courbes sont toutes deux positives

(1) Voir les *Installations électriques*, par A. SOULIER, p. 157.

(au-dessus de l'axe OA), on peut dire que les courants dans la bobine « ampères » et dans la bobine « volts » sont de même sens, ils vont donc s'attirer. Il arrive un moment où la différence de potentiel devient négative, tandis que l'intensité est encore positive : il y aura répulsion.

Lorsqu'il y a égalité entre l'attraction et la répulsion (cas de la figure 28, p. 46) le wattmètre marque zéro; c'est bien en effet le cas d'une puissance nulle. Au contraire, dans le cas de la figure 26 où il n'y a pas de retard et où les courbes sont en phase, il n'y a pas de répulsion venant contre-balancer l'attraction et les indications du wattmètre concordent avec celles de l'ampèremètre.

Facteur de puissance ou cosinus φ . — Revenons au cas de notre moteur; nous avons :

Puissance réelle = 1 440 watts.

Puissance apparente = 1 800 volts-ampères.

Quel rapport y a-t-il entre les deux?

Nous avons :

$$\frac{P_r}{P_a} = \frac{1440}{1800} = 0,8.$$

Nous dirons que le *facteur de puissance* est de 0,8

Dans le cas des lampes $\frac{P_r}{P_a} = \frac{1800}{1800} = 1$, le facteur de puissance est égal à 1.

Ainsi qu'on le voit, les compagnies d'électricité ont tout intérêt à avoir de bons facteurs de puissance sur leurs réseaux, car les lignes à faible facteur de puissance les obligent à faire passer de grosses intensités et, par suite, à employer de gros câbles pour une puissance bien plus faible que celle que donnerait du courant continu dans ces conditions.

Les ingénieurs désignent quelquefois par $\cos \varphi$ (co-

sinus ϕ), le facteur de puissance parce que ce $\cos \phi$ se déduit des calculs, comme nous le verrons plus loin à propos de l'établissement des lignes et transformateurs.

Il suffira de se rappeler qu'en courant alternatif :
puissance réelle = *puissance apparente* $\times$ *facteur de puissance*, ou :

$$\text{puissance réelle} = E_{\text{eff}} \times I_{\text{eff}} \times \cos \phi.$$

Cette puissance réelle se mesure en *watts*.

Au contraire, la puissance apparente :

$$E_{\text{eff}} \times I_{\text{eff}}$$

se mesure en *volts-ampères*, ou, si elle est grande, en kilovolts-ampères (k V-A).

Le $\cos \phi$, ou facteur de puissance, s'obtient en divisant les indications données par un wattmètre par le produit de celles d'un voltmètre thermique par celles d'un ampèremètre thermique :

$$\cos \phi = \frac{\text{watts réels}}{\text{volts-ampères}}$$

Mesure de la fréquence des courants alternatifs. — Il y a en courant alternatif un autre facteur important à connaître qui n'existe pas avec le courant continu, c'est la *fréquence*.

On désigne industriellement, sous le nom de fréquence, le nombre de périodes complètes d'un courant alternatif qui se succèdent pendant une seconde.

Nous savons que la *période* d'un courant alternatif est représentée par deux *alternances*, c'est-à-dire par une poussée positive ou courant positif, suivie d'une poussée négative ou courant de sens inverse au premier. Pendant une seconde, il se succède dans les fils de nos canalisations industrielles, un certain nombre de périodes complètes; c'est ainsi que sur certains

réseaux la fréquence est de 50 *périodes* par seconde, dans d'autres de 25, etc. Cela veut dire que, pendant une seconde, il y a 50 courants positifs suivis chacun de 50 courants négatifs ou 25 si la fréquence est de 25. Remarquons en passant qu'avec du courant à la fréquence de 50 périodes par seconde, le courant s'annulera 100 *fois* par seconde, parce qu'il s'annule après le courant positif au moment où le courant de sens inverse va commencer, puis après le courant négatif, à la fin de la période, quand le courant positif va reprendre. Donc, une lampe à arc alimentée par des courants à 50 périodes s'éteint 100 fois par seconde; c'est pour cette raison que nous voyons « papillonner » la lumière de ces lampes. Avec du courant à la fréquence 25, le papillonnement est tel que la lumière est insupportable, il a fallu des dispositifs spéciaux pour en atténuer les effets. Ceci dit en passant, pour montrer comment on peut se rendre compte *de visu* de l'existence de la fréquence.

Comment mesurer cette fréquence, étant donné qu'il s'agit de courants se succédant très rapidement à raison de 25, 40 à 50 par seconde? Avec des fréquencemètres, répondrons-nous; mais comment ces appareils sont-ils établis? C'est ce que nous allons voir.

En premier lieu, si l'on veut connaître la fréquence exacte du courant alternatif d'un réseau, il n'y a qu'à compter le nombre de pôles des machines ou alternateurs qui alimentent ce réseau et mesurer ensuite la vitesse de rotation ou vitesse angulaire de la partie tournante, en tours par minute, à l'aide d'un compte-tours; une formule simple nous donnera la fréquence, comme l'on va s'en rendre compte.

Si l'on ne peut pas pénétrer dans l'usine, ce qui est souvent le cas, on utilisera chez soi un moteur synchrone (1) dont le fonctionnement se trouve intime-

(1) Voir *Les Moteurs électriques*, par A. SOULIER, p. 133.

ment lié aux pulsations du courant et qui nous permettra, lui aussi, par la mesure de sa vitesse au compte-tours et par la détermination du nombre de ses pôles, à connaître la fréquence exacte du réseau.

Considérons une bobine montée sur un axe qui se déplace entre les pôles d'un aimant ou d'un électro-aimant, c'est un petit alternateur. En faisant tourner cette bobine, elle s'approchera, par exemple, d'abord du pôle *nord* de l'aimant, s'en éloignera pour s'approcher du pôle *sud*, s'en éloignera et reviendra au point de départ. Elle aura fait un tour et accompli une *période complète*, puisqu'elle aura été le siège d'un courant que nous supposerons positif d'abord et négatif ensuite.

Si cette bobine fait 3 000 tours par minute, il se sera succédé 3 000 périodes pendant ce temps, puisqu'un tour correspond à une période, et par seconde il y aura eu

$$\frac{3\,000}{60} = 50 \text{ périodes.}$$

Supposons maintenant que cette même bobine, au lieu de passer devant deux pôles, l'un nord, l'autre sud, pendant qu'elle faisait un tour, soit passée devant quatre se succédant : *nord, sud, nord, sud*, il est évident qu'il se produira alors, pendant un tour, deux courants positifs et deux courants négatifs au lieu d'un seul de chaque; nous aurons donc *deux périodes complètes par tour*, et si l'arbre tourne à raison de 3 000 tours par minute nous aurons :

$$2 \times 3\,000 = 6\,000 \text{ périodes,}$$

soit, par seconde, $\frac{6\,000}{60} = 100 \text{ p : s.}$

Nous en déduisons que pour avoir seulement 50 périodes par seconde, il suffira de tourner deux fois

moins vite, c'est-à-dire à 1 500 tours par minute au lieu de 3 000.

Et voilà pourquoi les grands alternateurs dits « alternateurs volants » tournent relativement lentement puisqu'on les couple sur l'arbre d'une turbine hydraulique ne faisant, le plus souvent, que 60 à 80 tours par minute. Cependant ils fournissent des courants alternatifs à la fréquence de 40 à 50 périodes par seconde. Mais ici leur nombre de pôles très grand rachète la diminution de vitesse.

Il existe une formule simple permettant de relier ensemble la fréquence à la vitesse et au nombre de pôles, c'est la suivante :

$$f = \frac{pn}{60}.$$

f est la fréquence en périodes par seconde qui est égale au nombre p de *paires de pôles* multiplié par le *nombre de tours par minute* n , le produit étant divisé par 60.

EXEMPLES. — Prenons les cas précédents, d'abord la machine à deux pôles; son *nombre de paires de pôles* est de 1, donc $p = 1$, le nombre de tours par minute $n = 3\,000$, d'où :

$$f = \frac{1 \times 3\,000}{60} = 50 \text{ p : s.}$$

Dans le deuxième cas, où l'on a 4 pôles, le nombre de *paires de pôles* est 2 ($p = 2$), le nombre de tours $n = 3\,000$, d'où :

$$f = \frac{2 \times 3\,000}{60} = 100$$

et ainsi de suite.

Supposons une machine, ou alternateur volant,

ayant 80 pôles, et tournant à 60 tours par minute, nous avons $p = 40$ et $n = 60$, d'où :

$$f = \frac{40 \times 60}{60} = 40 \text{ périodes par seconde.}$$

Si l'on veut éviter de se livrer à ces petits calculs qui ne sont cependant pas très compliqués, on peut utiliser les fréquencemètres.

Presque tous les constructeurs d'appareils de mesure ont leurs fréquencemètres, et nous ne pouvons les citer tous; nous n'en retiendrons qu'un, le fréquencemètre Ferrié, établi par le général Ferrié, qui restera célèbre pour ses importants travaux en T. S. F.

Le fréquencemètre Ferrié se compose de deux appareils thermiques, c'est-à-dire utilisant la dilatation d'un fil échauffé par le courant. Ces deux fils chauds, réunis dans un même boîtier, entraînent chacun une aiguille, mais, tandis que l'un de ces fils est en série avec une simple résistance sans self-induction, l'autre fil reçoit le courant alternatif du réseau à travers une forte self-induction.

Il en résulte que, tandis que les indications données par l'aiguille du premier appareil sont sensiblement indépendantes de la fréquence et ne dépendent que de la tension, l'aiguille du fil en série avec la self-induction déviara d'autant moins que la fréquence sera plus grande parce que la self-induction *fait obstacle* aux pulsations rapides du courant. Au point de croisement des aiguilles, on trouve l'indication de la fréquence.

Cet appareil est gradué empiriquement, c'est-à-dire en prenant une série de points à des fréquences différentes obtenues avec un alternateur à nombre de pôles connus, dont on fait varier la vitesse.

D'autres appareils utilisent des lames vibrantes qui n'entrent en vibration que lorsque la fréquence

du réseau correspond à celle pour laquelle elles ont été réglées, mais leur détail de construction nous entraînerait trop loin.

Signalons, en terminant, qu'en dehors des fréquences industrielles qui oscillent entre 15, 25 et 50 périodes par seconde, on emploie en T. S. F., notamment des courants alternatifs à des fréquences considérables de 10 000, 20 000 et même 100 000 périodes par seconde.

De même, les immenses étincelles électriques que représentent les éclairs et la foudre ne sont autres que des décharges oscillantes dont la fréquence atteint parfois 200 000 périodes par seconde ! Pour mesurer de telles fréquences des procédés spéciaux sont employés, basés le plus souvent sur le phénomène de *résonance*, c'est-à-dire que l'on fait vibrer à l'unisson un circuit électrique dont on connaît tous les éléments et pour lequel la fréquence est connue, mais nous arrivons alors dans la haute science qui sort du cadre même de ce modeste ouvrage.

DEUXIÈME PARTIE

CALCUL DES APPAREILS
A COURANTS ALTERNATIFS

CHAPITRE PREMIER

Définition et emploi du sinus
et du cosinus

Sinus et cosinus. — Reprenons notre vieille machine à vapeur à piston qui nous a si bien servi (p. 15) pour montrer l'existence de la différence de phase qui existe entre les mouvements du tiroir et celui de la manivelle. Le mouvement alternatif de cette machine nous permettra de mieux saisir la raison de l'introduction du sinus et du cosinus dans l'étude des phénomènes alternatifs.

Supposons que nous ayons sous les yeux une très puissante machine à vapeur dont le plateau manivelle aurait 1 mètre de rayon, c'est-à-dire que la course du piston serait de 2 mètres. Dans ces conditions, la longueur totale de la circonférence décrite par l'axe du bouton de la manivelle sera de $2 \times 3,14 \times 1$, soit 6,28 m c'est-à-dire $2 \pi \times 1$, soit 2π tout

court (π est la lettre grecque (1) « pi », universellement employée pour désigner le rapport de la circonférence à son diamètre). Un demi-tour correspondra à π et un quart de tour à $\frac{\pi}{2}$.

Ceci entendu, mettons en marche notre machine à vapeur et observons l'allure du piston lorsque l'arbre tourne à vitesse constante. Considérons le piston (fig. 35) lorsqu'il est au fond du cylindre opposé à la manivelle, c'est ce que l'on appelle un des « points morts »; à cet instant sa vitesse est nulle, il vient de changer de sens de marche. Pendant le premier quart de tour, sa vitesse augmente graduellement et quand la manivelle passe au point le plus haut de la circonférence (au point $\frac{\pi}{2}$), le piston est au milieu de sa course, sa vitesse est maxima, puis la manivelle

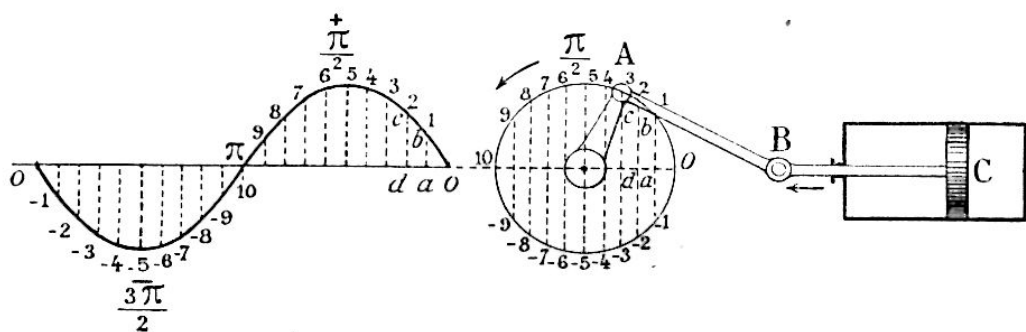


FIG. 35. — Valeurs successives du sinus d'un angle.

redescend et peu à peu la vitesse du piston diminue pour devenir nulle, quand il atteint l'autre extrémité de sa course. La manivelle est alors au point π , c'est-à-dire qu'elle a décrit, depuis l'origine, la moitié de la circonférence. Passant en dessous du diamètre horizontal, les mêmes phases recommencent pour le piston, c'est-à-dire que peu à peu sa vitesse

(1) Voir l'alphabet grec à la fin de cet ouvrage.

augmente, passe par un maximum quand la manivelle est au point le plus bas en $\frac{3\pi}{2}$, puis diminue de nouveau, et ainsi de suite.

Jusqu'ici rien que de très naturel, remarquons simplement que la vitesse du piston peut être représentée en grandeur par la longueur de la perpendiculaire abaissée du centre du bouton de la manivelle sur le diamètre horizontal d'origine. La longueur de cette perpendiculaire pour une circonférence de rayon égal à 1 est appelé le *sinus* de l'angle au centre que fait le point considéré sur la circonférence avec le diamètre d'origine.

Au point mort de départ le *sinus* est nul, car l'angle est nul, le bouton de manivelle étant sur le diamètre. Puis, à mesure que le bouton de manivelle s'avance le long de la circonférence la vitesse augmente; la perpendiculaire abaissée du centre de la manivelle sur la circonférence voit aussi sa longueur s'accroître, et quand le bouton a décrit un quart de tour, cette perpendiculaire se confond avec le rayon, ce qu'on exprime en disant que le sinus de l'angle de 90° est égal à 1.

Si nous continuons, nous voyons que la vitesse décroît, le sinus aussi; il s'annule en même temps que la vitesse au point π , change de signe quand la manivelle passe au-dessous du diamètre d'origine, grandit jusqu'à un maximum négatif au point $\frac{3\pi}{2}$, diminue de nouveau, puis tout recommence, et ainsi de suite.

En alignant à la suite les unes des autres ces diverses perpendiculaires, nous pouvons reconstituer sous forme de courbe la vitesse de notre piston, lorsque la manivelle tournant à vitesse constante parcourt la circonférence de longueur 2π , et cette

courbe obtenue par une succession de sinus s'appelle une *sinusoïde*; c'est par cette courbe que nous avons souvent représenté l'allure du courant alternatif lui-même dans les pages précédentes.

Remarquons en passant que la distance du pied de la perpendiculaire au centre O varie aussi avec l'angle, mais en sens inverse du sinus; on l'appelle le *cosinus*.

Mécanisme de la production des courants alternatifs. — Une fois familiarisés avec les mou-

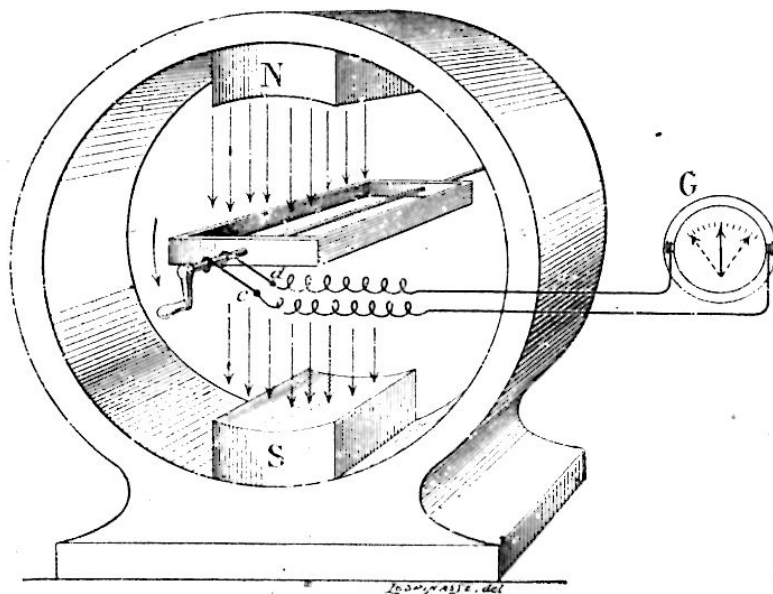


FIG. 36. — Mécanisme de la production des courants alternatifs.

vements alternatifs de la machine à vapeur, l'étude du mécanisme de la production des courants alternatifs n'est plus qu'un jeu avec ce que nous savons déjà.

Considérons (fig. 36) un gros inducteur à deux pôles d'une machine dynamo dont nous aurons enlevé l'induit. Supposons que par un artifice nous aimantions les deux pièces polaires N, S, en excitant leurs bobines à l'aide du courant d'une batterie d'accumulateurs par exemple; nous savons que,

dans ces conditions, des lignes de force s'échappent du pôle N (nord) pour rentrer dans le pôle S (sud).

Disposons dans la cavité intérieure, à la place de l'induit, un cadre en bois rectangulaire que nous pourrions faire tourner autour de son grand axe à l'aide d'une manivelle et enroulons du fil de cuivre isolé sur ce cadre. Deux bagues métalliques isolées, communiquant respectivement avec les extrémités du fil enroulé, nous permettront d'envoyer à l'aide de frotteurs *c* et *d* le courant produit dans un galvanomètre *G*.

Disposons le cadre horizontal, c'est-à-dire ayant son plan perpendiculaire à la direction des lignes de force, et faisons-le tourner en sens inverse des aiguilles d'une montre.

Si nous observons ce qui se produit, nous verrons l'aiguille dévier, passer par un maximum positif, revenir au zéro, changer de sens, passer par un maximum négatif, revenir au zéro et ainsi de suite.

Si nous analysons ce qui se passe, nous voyons qu'il ne peut en être autrement; en effet, supposons le cadre horizontal, il est alors traversé par un nombre de lignes de force maximum, ce que l'on traduit en disant que le flux qu'il embrasse est maximum.

Puis, à mesure que le cadre tourne, il se comporte vis-à-vis des lignes de force comme un robinet dans un courant d'eau : il se ferme et le nombre des lignes de force qui le traversent est de plus en plus réduit.

Soit (fig. 37) le cercle décrit par le cadre quand il tourne. Tandis que le cadre est sur le diamètre horizontal coïncidant avec la ligne $x'x$, il est traversé par le maximum de lignes de force; ces lignes sont représentées sur le dessin par des traits verticaux pointillés, ressemblant de loin à de la pluie qui tombe. Quand le cadre a tourné d'un angle aox et qu'il occupe une position telle que ac , le nombre de lignes de force qui passent à travers (nous allons écrire : le nombre de

gouttes de pluie qui le traversent) est représenté par les lignes qui passent entre b et d , les points b et d étant les pieds des perpendiculaires abaissées des extrémités a et c du cadre sur le diamètre horizontal. Or, ces perpendiculaires délimitent la *projection* du cadre sur le plan horizontal. On voit facilement que,

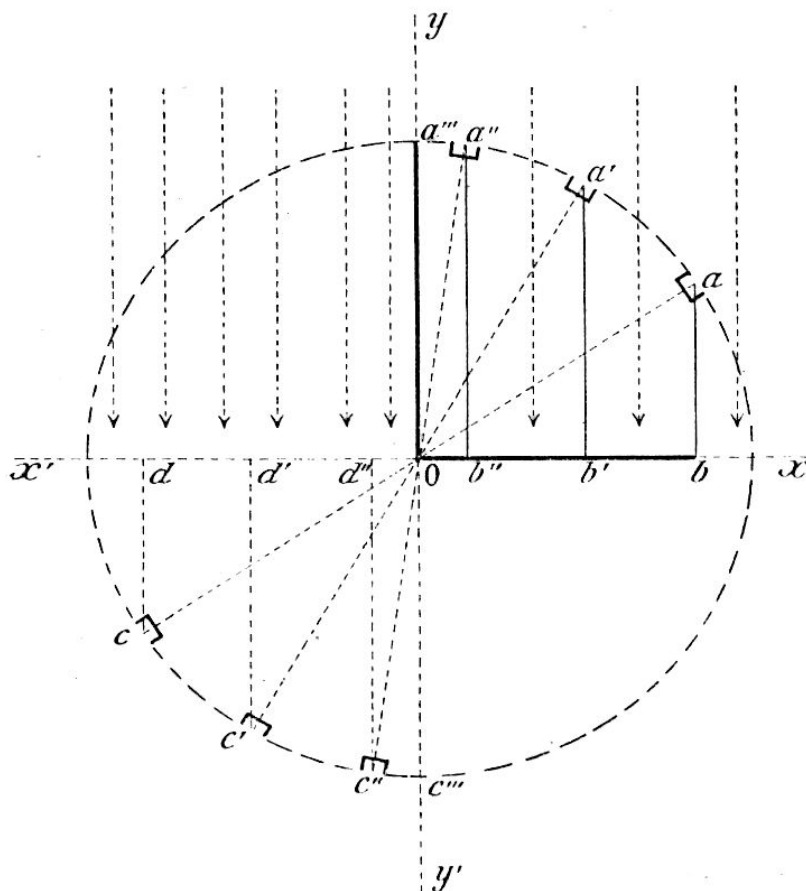


FIG. 37. — Valeurs successives de la force électromotrice.

à mesure que le cadre tourne, cette projection devient de plus en plus étroite et les lignes de force qui le traversent varient dans la même proportion.

Pour des positions du cadre telles que $a'c'$, $a''c''$, la projection n'est plus que $b'd'$, puis $b''d''$ et ainsi de suite. Lorsque le cadre a fait un quart de tour et qu'il occupe la position $a'''c'''$, plus aucune ligne

de force ne le traverse, sa projection se réduit au point o .

Or, de même que la vitesse du piston de la machine à vapeur est proportionnelle au *sinus* de l'angle que fait la manivelle avec le point mort, de même la force électromotrice qui prend naissance dans le cadre du fait de sa rotation dans le champ magnétique créé par les pôles N et S est constamment proportionnelle au *sinus* de l'angle qu'il fait avec la direction de départ. En d'autres termes, la force électromotrice est représentée par les perpendiculaires ab , $a'b'$, $a''b''$, etc. Mais le flux embrassé varie, lui, comme la projection du cadre sur le plan de départ, c'est-à-dire comme bd , $b'd'$, $b''d''$, etc. Or, la demi-projection ob , ob' , ob'' n'est autre que le *cosinus* de l'angle.

REMARQUE IMPORTANTE. — Il résulte de tout ceci que tandis que le flux embrassé varie comme le *cosinus* de l'angle que fait le cadre avec la position de départ normale aux lignes de force, la force électromotrice induite varie pendant le même temps comme le *sinus* du même angle.

EXEMPLE. — Prenons le cadre quand il est en ac , le flux embrassé est proportionnel à ob , c'est-à-dire au *cosinus* de l'angle aob et la force électromotrice est proportionnelle à ab , soit au *sinus* du même angle.

Calcul de la force électromotrice d'induction. — Il existe une règle simple et facile à retenir qui permet de calculer rapidement la force électromotrice induite dans les appareils à courants alternatifs. Cette formule due à M. Boucherot est la suivante.

Règle de M. Boucherot. — La force électromotrice efficace induite dans une spire présentant au flux une surface de 1 décimètre carré et dans laquelle l'induction varie sinusoïdalement de +

10 000 gauss à — 10 000 gauss avec une fréquence de 50 périodes par seconde est de 2,22 volts.

Donnons tout de suite un exemple pour l'application de cette règle.

Supposons que le cadre de notre expérience précédente soit tel que la surface embrassée par une spire du fil qu'il supporte, soit de 1 décimètre carré. Supposons également que le flux magnétique soit tel que l'induction maximum $\mathfrak{B}_{\max}$ soit de 10 000 gauss (1) et que le cadre tourne à la vitesse de 3 000 tours par minute, soit $\frac{3\,000}{60} = 50$ tours par seconde correspon-

dant, puisqu'il y a deux pôles N et S, à la fréquence de 50 périodes par seconde (voy. p. 73). Dans ces conditions, il y aura juste 2,2 volts entre les extrémités du fil constituant la spire, et s'il y a 40 spires, il y aura en tout :

$$40 \times 2,2 = 88 \text{ volts efficaces.}$$

Mais, dira-t-on, dans toutes les machines l'induction n'est pas forcément de 10 000 gauss, de même que la vitesse peut prendre toute autre valeur que 3 000 tours par minute. Soit, la règle ne s'applique pas moins. Prenons par exemple le cas où l'induction serait $\mathfrak{B}_{\max} = 3\,500$ et la vitesse 2 400 t : mn correspondant à la fréquence 40, la force électromotrice, de 2,2 sera réduite dans la proportion du produit :

$$\frac{3\,500}{10\,000} \times \frac{40}{50} = 0,28$$

elle ne sera donc plus que :

$$E_{\text{eff}} = 0,28 \times 2,2 = 0,616 \text{ volt}$$

toujours pour une spire de 1 décimètre carré. Et si

(1) Le calcul des électro-aimants, page 238, tome I des *Leçons pratiques d'électricité industrielle (courant continu)*, Garnier, éditeur, permet de déterminer la valeur de l'induction.

la spire a, par exemple, $0,5 \text{ dm}^2$, la force électromotrice sera réduite en proportion, elle deviendra :

$$E_{\text{eff}} = 0,616 \times 0,5 = 0,308 \text{ volt.}$$

Dans les calculs on pourra : soit prendre la surface d'une spire et multiplier cette surface par le nombre de spires, ce qui reviendra à supposer que l'on a une spire unique de la surface totale ainsi trouvée, soit calculer la force électromotrice correspondant à une spire et multiplier cette force électromotrice par le nombre de spires. Quoi qu'il en soit, nous écrirons cette formule de la façon suivante :

$$E_{\text{eff}} = \frac{S}{1} \times \frac{\alpha_{\text{max}}}{10\,000} \times \frac{f}{50} 2,2 \text{ volts.}$$

Remarquons en passant que si :

$S = 1$, $\alpha = 10\,000$ et $f = 50$, on a $E_{\text{eff}} = 2,2 \text{ volts.}$

Cette règle n'est pas empirique comme on pourrait le croire à première vue, elle peut s'établir par le calcul, ainsi que nous allons l'indiquer; elle est pratique et facile à retenir, c'est pourquoi nous l'avons tout de suite indiquée. Sa démonstration peut être passée sous silence si l'on veut bien l'admettre, nous la donnerons néanmoins pour ceux qui voudraient y avoir recours.

Détermination de la formule donnant la force électromotrice d'induction. — Il est un fait démontré par l'expérience que la force électromotrice d'induction est proportionnelle à la vitesse de variation du flux. Une magnéto donne une tension en volts à vide absolument proportionnelle à la vitesse de son induit, ce qui a permis de réaliser des indicateurs de vitesse basés sur ce phénomène. Nous

pouvons donc écrire que la force électromotrice est proportionnelle à

$$\omega \times \Phi$$

(ω « oméga » : lettre grecque employée pour désigner la vitesse angulaire, Φ est le flux).

Cette notion s'accorde bien avec ce que nous savons déjà (t. I), c'est-à-dire que la force électromotrice est d'autant plus élevée que le temps pendant lequel se produit la variation du flux est plus petit.

Or, une vitesse est par définition le rapport qui existe entre un chemin et le temps mis à le parcourir (on dit d'un train qu'il marche à la vitesse de 60 kilomètres à l'heure, etc.). Pour évaluer la vitesse de notre cadre, nous supposons qu'il entraîne un mobile se déplaçant sur une circonférence de rayon égal à 1 (cercle trigonométrique), et nous mesurerons le temps qu'il mettra à parcourir cette circonférence de longueur 2π , soit T ce temps. Sa *vitesse* sera $\frac{2\pi}{T}$.

Mais ne perdons pas de vue que, quand le cadre a fait un tour dans le champ magnétique, il a fourni une période complète de courant alternatif. Comme généralement le nombre des variations de flux est exprimé industriellement en périodes par seconde, nous dirons :

Puisqu'il a fallu à la période le temps T pour se produire, il y aura dans une seconde autant de périodes que le nombre T sera contenu dans une seconde, soit $\frac{1}{T}$. Le nombre $\frac{1}{T}$ représentera donc le nombre de périodes par seconde, c'est-à-dire la fréquence f ; nous l'introduirons dans la formule de la façon suivante : La force électromotrice est, avons-nous dit, proportionnelle à $\omega \times \Phi$. Or, la vitesse ω de variation du flux peut être remplacée, d'après ce que

nous venons de voir, par $\frac{2\pi}{T}$; nous aurons donc pour la force électromotrice une valeur proportionnelle à :

$$\frac{2\pi}{T} \times \Phi$$

ce que l'on peut écrire :

$$2\pi \times \frac{1}{T} \times \Phi$$

et en remplaçant $\frac{1}{T}$ par la fréquence f , nous avons :

$$2\pi \times f \times \Phi$$

Pour avoir la valeur en *volts* de la force électromotrice, il faut diviser ce produit par 10^8 , mais on obtient ainsi la valeur maxima de la force électromotrice :

$$E_{\max} = \frac{2\pi \times f \times \Phi}{10^8}.$$

Comme c'est la force électromotrice efficace qui nous intéresse, il faudra introduire le facteur $\sqrt{2}$ en se rappelant que $E_{\text{eff}} = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}}$. Nous aurons donc finalement :

$$E_{\text{eff}} = \frac{2\pi \times f \times \Phi}{\sqrt{2} \times 10^8} \text{ volts.}$$

Or, dans les calculs, le flux Φ est donné le plus souvent par le nombre de lignes de force traversant une section déterminée, c'est-à-dire par le produit de l'induction $\mathcal{B}$ par la surface traversée S en centimètres carrés. (Voir *Le courant continu*, p. 235.)

$$\Phi = \mathcal{B} \times S.$$

Remplaçant Φ par cette valeur, nous avons :

$$E_{\text{eff}} = \frac{2\pi \times f \times \omega \times S}{\sqrt{2} \times 10^8}.$$

Si nous supposons :

$$\omega = 10\,000 \text{ et } S = 100 \text{ cm}^2 \text{ et } f = 50 \text{ p : s.},$$

nous aurons, puisque $\sqrt{2} = 1,414$:

$$E_{\text{eff}} = \frac{6,28 \times 50 \times 10\,000 \times 100}{1,414 \times 10^8} = 2,2 \text{ volts.}$$

La règle donnée par M. Boucherot n'est donc pas empirique, elle résulte de l'introduction des chiffres ci-dessus dans la formule donnant la force électromotrice d'induction. C'est pour ne pas refaire chaque fois le calcul que nous adopterons la règle de M. Boucherot dite des 2,2 volts.

CHAPITRE II

Calcul des bobines d'inductance

Force électromotrice de self-induction. —

Nous avons vu (p. 11) à propos de la self-induction que l'introduction dans un circuit parcouru par du courant alternatif d'une bobine de self-induction a pour effet : 1° de décaler ce courant sur la force électromotrice qui lui a donné naissance, et 2° d'opposer au passage de ce courant une résistance beaucoup plus grande que celle qui correspond au fil constituant l'enroulement. Tandis que la raison d'être du décalage va pouvoir s'expliquer grâce à ce que nous savons déjà, la résistance supplémentaire que paraît offrir au courant alternatif la bobine de self-induction est presque évidente et découle du principe même de la bobine de self-induction.

Nous venons de voir qu'une bobine tournant dans un champ magnétique était le siège d'une force électromotrice alternative; il est bien évident que si on laisse la bobine fixe et si on fait tourner l'inducteur autour, on aura réalisé l'expérience sous une autre forme et un flux alternatif traversera encore la bobine, fixe cette fois, mais qui sera le siège cependant d'une force électromotrice alternative.

Laissons encore la bobine fixe et envoyons dans ses spires un courant alternatif; ce courant engen-

drera un flux comme tout courant, et ce flux sera alternatif lui aussi; on aura ainsi réalisé encore un flux alternatif au travers de la bobine, et il en résultera, tout comme précédemment, une force électromotrice induite dans les spires de fil de la bobine.

Dans ce cas, c'est le courant qui produit *lui-même* la force électromotrice, d'où le nom de *self-induction* donné à ce phénomène. (*Self* est un mot anglais qui veut dire « soi-même ».)

Le terme « bobine de self-induction » est très répandu, mais on lui donne parfois celui de *bobine* de réactance, qui laisse encore mieux subsister dans l'esprit le phénomène de réaction du courant.

Cette force électromotrice nous savons la calculer, la règle précédente nous l'a appris et nous verrons un peu plus loin comment on l'applique pratiquement. Avant d'y arriver, examinons d'un peu près quelle est la résistance apparente que la bobine de self-induction offre au courant alternatif par le fait de sa réactance qui s'ajoute, nous verrons comment, à sa résistance ohmique simple.

Nous avons vu (p. 87) qu'une bobine soumise à des variations périodiques de flux, était le siège d'une force électromotrice proportionnelle à la vitesse des variations de ce flux, c'est-à-dire à :

$$\omega \times \Phi$$

ω étant cette vitesse et Φ le flux.

Ceci pour une spire; s'il y en a n , la force électromotrice sera naturellement n fois plus grande, c'est-à-dire proportionnelle à $\omega \times \Phi \times n$, et si nous voulons l'obtenir en volts, nous savons que nous devons diviser cette expression par 10^8 , en sorte que nous aurons :

$$E_{\max} = \frac{\omega \times \Phi \times n}{10^8} \text{ volts.}$$

Mais nous avons appris (t. I, p. 226) à calculer le flux Φ , et nous savons que l'on peut lui appliquer la loi d'Ohm et dire que le flux est le quotient de la force magnétomotrice $1,25 I_{\max} \times n$ par la réluctance $\mathcal{R}$ du circuit;

en remplaçant Φ par $\frac{1,25 I_{\max} \times n}{\mathcal{R}}$ nous aurons :

$$E_{\max} = \frac{\omega \times 1,25 I_{\max} n \times n}{\mathcal{R} \times 10^8} \text{ volts,}$$

ou :

$$\frac{\omega \times 1,25 I_{\max} n^2}{\mathcal{R} \times 10^8} \text{ volts,}$$

ce que nous pouvons écrire encore :

$$E_{\max} = \omega \times I_{\max} \times \frac{1,25 \times n^2}{\mathcal{R} \times 10^8}$$

Or, le terme sous forme de fraction : $\frac{1,25 \times n^2}{\mathcal{R} \times 10^8}$ ne dépend que de la bobine, c'est-à-dire de son nombre de spires d'une part et de la résistance magnétique de son circuit d'autre part.

Nous pouvons dire que ce terme représente l'action réactive de la bobine, c'est-à-dire qu'il est proportionnel à sa self-induction et pour abréger nous le désignerons par la lettre L :

$$L = k \frac{n^2}{\mathcal{R}}$$

k étant une constante englobant 1,25 et 10^8 .

Retenons, en passant, que la self-induction ou la réactance d'un circuit est proportionnelle au *carré du nombre de spires* et inversement proportionnelle à sa *résistance magnétique*.

En d'autres termes, la réactance sera d'autant plus

grande qu'il y aura plus de spires et que la résistance magnétique du circuit sera plus faible.

Voilà pourquoi, si l'on introduit un noyau de fer dans l'axe d'une bobine, sa self-induction devient bien plus grande que s'il n'y en avait pas, et si l'on vient à fermer le circuit magnétique de ce noyau de fer par une pièce de fer qui réunit par l'extérieur les extrémités du noyau, on a une self-induction encore plus grande, la résistance magnétique du circuit ayant été diminuée.

C'est pour cette raison également que la self-induction d'un électro-aimant est plus grande quand on met une armature de fer joignant ses deux pôles que lorsqu'il n'y en a pas.

Unité de self-induction. — L'unité de self-induction s'appelle le *henry*; elle est représentée par la self-induction d'une bobine parcourue par un courant alternatif tel que :

$$I_{\max} = 1 \text{ ampère}$$

avec une vitesse de variation de 1 période par seconde et avec laquelle on aurait une force contre-électromotrice de 1 volt.

Remplaçant dans la formule précédente (p.91) la self-induction $\frac{1,25 \times n^2}{R \times 10^8}$ par son symbole L , nous écrirons, ce qui simplifiera :

$$E_{\max} = \omega L I_{\max}.$$

Si nous partons de l'intensité efficace $I_{\text{eff}} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$, nous aurons de même pour la force électromotrice efficace :

$$E_{\text{eff}} = \omega L I_{\text{eff}}.$$

Résistance apparente. — Nous sommes maintenant en possession de tous les éléments nécessaires pour déterminer la résistance apparente offerte au courant alternatif par une bobine de réactance ou même par un circuit quelconque. Cette question est

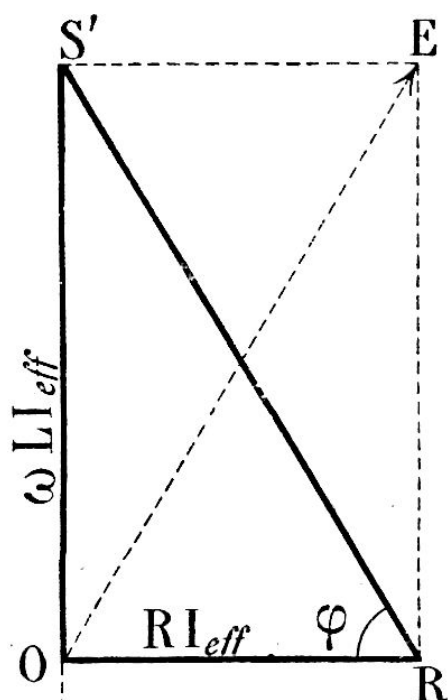


FIG. 38.

Détermination de la résistance apparente.

d'importance, puisqu'elle nous permettra de calculer les lignes de distribution d'énergie et les appareils eux-mêmes qu'elles alimenteront.

Prenons une bobine de réactance quelconque et examinons-la. Le fil de cuivre qui la constitue a une certaine résistance R , évaluée en ohms, telle que s'il fallait maintenir dans ce fil un courant continu d'une intensité de I ampères, il faudrait appliquer aux extrémités une différence de potentiel dont la valeur en volts serait :

$$E = RI.$$

Supposons pour un instant que notre bobine n'ait pas du tout de self-induction et faisons-la parcourir par un courant alternatif d'une intensité I_{eff} quelconque, elle se comportera comme avec le courant continu et à ses extrémités, il se développera une tension alternative $E_{\text{eff}} = RI_{\text{eff}}$.

Portons sur une droite horizontale (fig. 38), à partir d'un point O pris comme origine, une longueur OR proportionnelle à RI_{eff} cela nous détermine le point R .

Tenons compte maintenant de la self-induction;

nous savons que la force électromotrice d'induction est en retard de 90° sur le courant qui l'a produite; cette force électromotrice étant en retard de 90° sur I_{eff} , nous porterons sa valeur sur une perpendiculaire à OR tracée en dessous et telle que OS , la valeur OS étant proportionnelle à la force électromotrice de self-induction qui est égale, d'après ce que nous venons de voir, à

$$\omega L I_{\text{eff}}$$

Mais pour vaincre cette force électromotrice, il va falloir réagir et lui opposer une force électromotrice égale, mais de signe contraire.

Nous porterons donc sur le prolongement de OS , mais de l'autre côté de OR , une longueur OS' égale à $\omega L I_{\text{eff}}$.

La force électromotrice totale qu'il faudra appliquer à la bobine devra vaincre :

1° La chute de tension RI_{eff} due à la résistance ohmique;

2° La force contre-électromotrice de réactance. Cette force électromotrice totale sera la *résultante* de ces deux forces, c'est-à-dire, en traçant le parallélogramme des forces, la droite OE .

Or OE , diagonale du rectangle $OS'ER$, est égale à l'autre diagonale $S'R$ du même rectangle, et l'application du théorème bien connu du carré de l'hypothénuse au triangle rectangle ORS' nous donne :

$$\overline{RS'}^2 = \overline{OR}^2 + \overline{OS'}^2.$$

c'est-à-dire :

$$\overline{RS'}^2 = RI_{\text{eff}}^2 + \omega^2 L^2 I_{\text{eff}}^2$$

mais $RS' = OE$, c'est-à-dire que cette valeur est la résultante ou la tension E_{eff} totale nécessaire pour faire passer le courant I_{eff} à travers la bobine en

surmontant la résistance et la réactance; remplaçons nous aurons :

$$E_{\text{eff}}^2 = R^2 I_{\text{eff}}^2 + \omega^2 L^2 I_{\text{eff}}^2$$

ou, en mettant I_{eff} en facteur :

$$E_{\text{eff}}^2 = I_{\text{eff}}^2 (R^2 + \omega^2 L^2)$$

et en extrayant la racine carrée :

$$E_{\text{eff}} = I_{\text{eff}} \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}.$$

D'où l'on tire, pour la valeur du courant traversant une bobine de self-induction aux bornes de laquelle existe une différence de potentiel E_{eff} connue :

$$I_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}.$$

Cette formule est très importante à retenir, c'est elle qui reviendra à chaque instant de même que le triangle rectangle ORS', que nous reverrons dans la plupart des calculs d'appareils ou de lignes à courant alternatif.

Remarquons que c'est la loi d'Ohm $I = \frac{E}{R}$, à cela près que le terme R est remplacé par :

$$\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}.$$

Ce terme sous le radical est appelé par analogie la *résistance apparente* du circuit; on voit que si $\omega L = 0$ (cas d'une réactance nulle) on retrouve la loi d'Ohm :

$$I = \frac{E}{R}.$$

Cette résistance apparente est non seulement d'autant plus élevée que la self-induction L est elle-même plus grande, mais encore elle augmente avec la

fréquence des variations de flux. Cette remarque explique bien des choses.

Lorsqu'un conducteur électrique est frappé par la foudre, on observe parfois des choses étranges : au lieu de suivre constamment le conducteur, la décharge atmosphérique saute d'une spire à l'autre si ce conducteur forme des boucles. Cependant, il semble à première vue que les boucles sont beaucoup moins résistantes que l'air qui les sépare. Il n'en est rien, les décharges atmosphériques ou éclairs sont constituées par des courants alternatifs à la fréquence de plusieurs millions de périodes par seconde; le terme ω devient donc considérable, il s'ensuit que la résistance apparente de la boucle de fil, quoique représentant une valeur ohmique faible, n'en est pas moins énorme parce que le terme ωL prime tout.

Un exemple fixera mieux les idées.

EXEMPLE. — *Une bobine cylindrique sans fer de 50 spires de 11 centimètres de diamètre chacune est mise en série avec le fil de ligne d'une distribution d'énergie à courants alternatifs à 50 périodes par seconde. Quelle est sa résistance apparente pour les courants industriels et pour ceux de la foudre, auxquels on attribue la fréquence de 500 000 périodes par seconde, sachant que sa résistance ohmique est négligeable et sa self-inductance de 0,000 063 henry?*

Nous négligeons donc le terme R , reste le terme ωL qui ne sera pas le même, suivant que ω correspondra aux courants industriels de fréquence $f = 50$ p : s. ou à ceux de la foudre de fréquence $f = 500\,000$ p : s.

Nous avons vu (p. 87) que l'on pouvait remplacer le terme ω qui est la vitesse de variation du flux par le terme $2\pi f$:

$$\omega = 2\pi f.$$

Nous aurons donc :

1° avec le courant industriel à la fréquence de 50 p : s. comme résistance apparente :

$$\omega L = 2\pi \times 50 \times 0,000\ 063 = 0,0198 \text{ ohm,}$$

c'est-à-dire moins de *deux centièmes d'ohm*;

2° avec la foudre, courant de fréquence :

$$f = 500\ 000 \text{ p : s.}$$

$$\omega L = 2\pi \times 500\ 000 \times 0,000\ 063 = 198 \text{ ohms.}$$

Ainsi donc, la résistance deviendra 10 000 fois plus grande, ce qui est énorme.

Voilà pourquoi on recommande, dans l'établissement des paratonnerres, d'avoir des conducteurs de descente à la terre aussi droits que possible, tout coude, à cause de la réactance qu'il oppose, pouvant obliger la foudre à sauter à travers l'air vers un conducteur voisin présentant une réactance moins grande.

Calcul d'une bobine de réactance de lampe à arc. — Lorsqu'on faisait fonctionner autrefois des lampes à arc sur les réseaux de distribution de courant utilisant 110 volts entre fils, on montait généralement les lampes par deux en série avec un rhéostat si le courant était continu et avec une bobine de self-induction ou de réactance si le courant était alternatif. Dans le rhéostat se produisait une chute de tension RI variable avec l'intensité du courant ce qui aidait le réglage, et dans la bobine de réactance il s'établissait une chute de tension ωLI , qui joue le même rôle pour le fonctionnement des lampes, avec cet avantage que, contrairement à ce qui se passe dans le rhéostat, la chute de tension est obtenue sans perte d'énergie. C'est une bobine de ce genre que nous allons calculer et son établissement pourra servir de point de départ au calcul de bobines

plus grandes ou plus petites pour telle application que l'on désirera.

DONNÉES DU PROBLÈME. — *Intensité du courant dans la bobine $I_{\text{eff}} = 6$ ampères; fréquence du courant : $f = 50$ périodes par seconde; chute de tension à obtenir : $U = 32$ volts.*

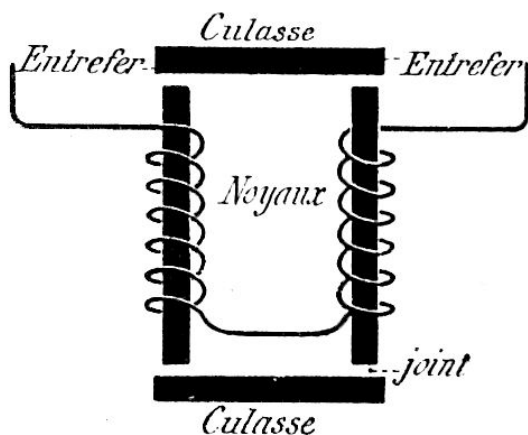


FIG. 39. — Schéma d'une bobine de réactance.

Nous constituerons la bobine par deux noyaux de fer qui seront feuilletés pour diminuer les courants de Foucault, entourés chacun par une bobine magnétisante et réunis par deux culasses également en fer feuilleté (fig. 39).

L'enroulement, que nous supposons pour simplifier les calculs de résistance négligeable, étant traversé par un courant de 6 ampères donnera naissance à un flux dans le fer. Pour déterminer son nombre de spires, nous nous imposerons une induction $\mathcal{B}_{\text{max}} = 5\,000$ gauss, ce qui est un chiffre relativement bas, rendant faibles les pertes par courants de Foucault et hystérésis.

Nous prendrons pour l'entrefer 2,5 millimètres sur chaque noyau, soit 5 millimètres au total, et nous supposons que les deux autres joints correspondent à un intervalle d'air de 0,5 millimètre chacun, soit 1 millimètre pour tous les deux.

Nombre de spires. — Nous savons que pour entretenir une induction maxima de 5 000 gauss dans le circuit magnétique (1) il faut :

(1) Voir *Leçons pratiques d'électricité industrielle (Le courant continu)*, par A. SOULIER, t. I, p. 245.

1° Pour l'entrefer total, soit 6 millimètres ou 0,6 centimètre à raison de 4 000 ampères-tours par centimètre. . . . $0,6 \times 4\,000 = 2\,400$ ampères-tours;

2° Dans le fer que nous supposons d'une longueur totale de 20 centimètres environ, il faudra 1,6 ampère-tour par centimètre, soit $1,6 \times 20 = 32$ ampères-tours.

Et au total 2 432 ampères-tours.

Mais il s'agit ici d'une induction maximum, et par suite d'ampères-tours maximum; or, ce qui nous intéresse, c'est l'intensité efficace, il faudra donc diviser ce nombre par $\sqrt{2}$, soit par 1,414. On aura :

$$\frac{2\,432}{\sqrt{2}} = 1\,730 \text{ ampères-tours efficaces.}$$

Comme il passe 6 ampères efficaces, le nombre de spires est de :

$$\frac{1\,730}{6} = 288 \text{ spires.}$$

Pour que ce fil ait une résistance négligeable nous le prendrons assez gros, soit d'un diamètre de 3,5 millimètres (35 dixièmes de millimètre).

Section du fer. — Pour calculer le noyau de fer nous appliquerons la règle de 2,2 volts (voir p. 85), c'est-à-dire que nous nous baserons sur ce qu'une spire entourant un noyau de fer de 1 décimètre carré de section qui est le siège de variations alternatives de flux à raison de 50 périodes par seconde, donnant lieu à une induction maxima $\mathcal{B} = 10\,000$ gauss

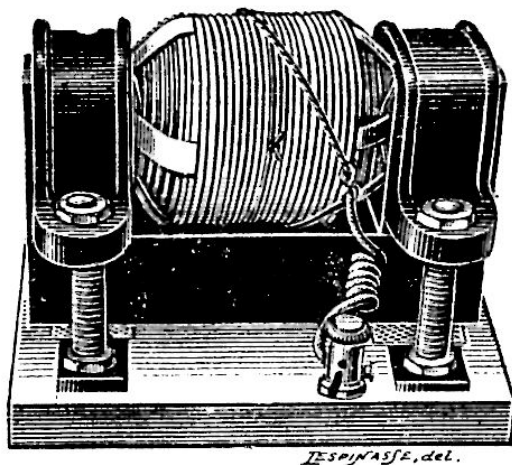


FIG. 40. — Vue d'ensemble d'une bobine de réactance.

présente une différence de potentiel efficace de 2,2 volts entre ses extrémités.

Dans ces conditions, si le noyau de fer avait 1 décimètre carré de section, il y aurait entre les bornes de la bobine une différence de potentiel :

$$E_{\text{eff}} = 288 \text{ spires} \times \frac{5\,000 \text{ g.}}{10\,000 \text{ g.}} \times 2,2 = 317 \text{ volts.}$$

Comme nous ne voulons avoir que 32 volts, la section du noyau de fer devra être réduite dans le rapport de 317 à 32, c'est-à-dire avoir $\frac{317}{32} = 10$ centi-

mètres carrés en chiffres ronds. Nous avons maintenant tous les éléments pour construire notre bobine.

Si nous voulons augmenter la chute de tension dans notre bobine, nous n'aurons qu'à diminuer l'entrefer, l'induction augmentera et avec elle la tension. Pratiquement, on constitue l'entrefer par des cales de carton que l'on enlève ou que l'on introduit pour obtenir la tension que l'on désire.

Notons, pour terminer, que le coefficient de self-induction de cette bobine serait : $L = \frac{E_{\text{eff}}}{\omega I_{\text{eff}}}$ (voir p. 92)

$$\text{soit, } L = \frac{32}{2 \times 3,14 \times 50 \times 6} = 0,016 \text{ henry.}$$

CHAPITRE III

Facteur de puissance ou cosinus φ

Puissance absorbée par une bobine de réactance. — Nous avons vu qu'une bobine de self-induction ou de réactance absorbe une puissance que nous avons appelée *apparente* parce qu'elle résulte du produit des indications d'un voltmètre thermique par celles d'un ampèremètre, et une *puissance réelle* ou active qui est mise en évidence par un wattmètre convenablement relié à cette bobine.

Nous savons que la puissance réelle se déduit de la puissance apparente, à condition de multiplier cette dernière par un facteur toujours plus petit que 1 et que l'on appelle le *facteur de puissance*. Pour expliquer la présence de ces deux puissances, nous avons montré qu'elles résultent du fait qu'entre le courant qui traverse la bobine et la différence de potentiel qui est à ses bornes, il existe une différence de phase par suite du retard occasionné par l'établissement du champ magnétique à l'intérieur de la bobine, champ qui tend à produire, en vertu de la loi de Lenz, un courant s'opposant aux variations.

Pour mieux nous représenter le phénomène, nous ramènerons à deux composantes la puissance apparente prise par notre bobine. Supposons que OF

la direction de la différence de potentiel, elle est comparable à la puissance absorbée par une résistance ohmique pour laquelle il n'y a pas de décalage du courant sur l'intensité, c'est la *puissance active* ou *réelle*, elle est en quelque sorte palpable et se traduit par l'échauffement de la bobine; on l'appelle aussi puissance wattée, mais nous ne conseillerons pas cette expression.

La composante OC est dirigée dans une direction perpendiculaire à celle de la différence de potentiel OF. On l'appelle *puissance réactive*; elle est en quadrature, c'est-à-dire qu'elle fait un angle de 90° avec la puissance active. Elle est appelée aussi puissance *magnétisante*.

En somme, la décomposition de la puissance apparente en ses deux éléments, la *puissance active* et la *puissance réactive*, correspond à la décomposition du courant en deux autres courants fictifs dont l'un marcherait avec la différence de potentiel en engendrant de la puissance réelle, et dont l'autre au contraire serait décalé de 90° sur la différence de potentiel.

Ce dernier courant ne produisant pas de puissance utile est donc plutôt nuisible, puisque, malgré tout, les lignes doivent être prévues pour le transmettre; on voit tout de suite la nécessité de diminuer ou même de supprimer si possible le courant réactif. Mais, dira-t-on, quel est le rôle de ce courant? Ce courant, appelé quelquefois courant magnétisant, ne sert qu'à entretenir le champ magnétique alternatif dont le noyau de la bobine est le siège, et à provoquer la force contre-électromotrice; nous savons qu'il correspond à une puissance nulle, ainsi que le montre nettement le diagramme de la figure 28. Au contraire, l'autre courant, dit *actif* ou en phase, est celui qui produit la puissance réelle absorbée par la bobine, puissance employée : 1° à échauffer le

fil de l'enroulement (perte par effet Joule RI^2); 2° à entretenir les courants de Foucault que l'on atténue en lamellant le noyau de fer et en isolant les feuilles de tôle qui le constituent. Cette perte est proportionnelle au carré de l'induction, c'est-à-dire à $\mathcal{B}^2$; 3° enfin une dernière partie est absorbée par le phénomène d'hystérésis, c'est-à-dire qu'elle contribue à échauffer le noyau de fer par le fait des inversions du champ magnétique, elle est proportionnelle à la puissance 1,6 de l'induction (loi de Steinmetz).

Il est évident que si ces pertes n'existaient pas, le vecteur OB se réduirait au point O et la droite OA se confondrait avec OC, le courant serait exactement en retard de 90° sur la force électromotrice et la puissance réelle serait nulle; ce serait ce qui se passerait avec une self-induction parfaite, laquelle jusqu'à présent n'existe pas, comme bien des choses absolument parfaites.

Si nous insistons particulièrement sur la décomposition du courant en deux composantes, c'est que leur emploi nous sera très commode dans les calculs d'appareils. En déterminant soigneusement les deux composantes on en déduira leur résultante, la seule qui nous intéresse puisqu'elle seule existe, les deux composantes n'étant qu'une image.

Pour la commodité des calculs nous nous rappellerons que :

$$\overline{P_{app}}^2 = \overline{P_{réelle}}^2 + \overline{P_{magn}}^2.$$

Cela découle de l'observation du triangle rectangle OBC, dans lequel $\overline{BC}^2$ ou $\overline{OA}^2 = \overline{OB}^2 + \overline{OC}^2$.

Il en résulte que l'on peut calculer la *puissance magnétisante* si l'on connaît la puissance réelle et la puissance apparente.

$$\begin{aligned} \text{On a en effet } \overline{P_{magn}}^2 &= \overline{P_{app}}^2 - \overline{P_{réelle}}^2 \\ \text{d'où } P_{magn} &= \sqrt{\overline{P_{app}}^2 - \overline{P_{réelle}}^2}. \end{aligned}$$

Or la puissance apparente est donnée par le produit des indications d'un *voltmètre* par celles d'un *ampèremètre* et la puissance réelle par un *wattmètre* (voir page 71).

Détermination du facteur de puissance ou cosinus φ . — Revenons à la figure 41 et considérons le vecteur OB; c'est, avons-nous dit, la projection de OA sur la direction OF. Cherchons à déterminer sa valeur; connaissant OA et l'angle φ , pour cela traçons de O comme centre avec un rayon égal à l'unité; (ce sera le mètre si le dessin est assez grand, le décimètre, ou même le centimètre suivant que l'on aura choisi ces unités pour les commodités du dessin). Ce cercle, appelé cercle trigonométrique, coupe le prolongement de OA en D et le prolongement de OB en F.

Abaïssons du point D une perpendiculaire DE sur OF, elle nous déterminera le point E et la projection du rayon OD sera OE; mais si nous nous reportons à la figure 36 dans laquelle nous avons utilisé aussi le cercle trigonométrique, nous avons vu que la projection du rayon sur le diamètre horizontal de départ représente le cosinus de l'angle que fait ce rayon avec le diamètre. Donc OE est le cosinus de l'angle AOB, c'est-à-dire de l'angle φ , ce que nous écrirons :

$$OE = \cos \varphi$$

Ces longueurs telles que OE ont été calculées pour tous les angles compris entre 0° et 90° , après elles se répètent, leur signe seul est changé. Nous donnons ci-contre ce tableau.

TABLEAU DES TANGENTES, COSINUS ET SINUS
pour les angles de 0 à 90°

ANGLES	TANGENTE	COSINUS	SINUS	ANGLES	TANGENTE	COSINUS	SINUS
0°	0,0000	1,0000	0,0000	46°	1,0353	0,6947	0,7193
1	0,0174	0,9998	0,0174	47	1,0724	0,6820	0,7314
2	0,3049	0,9994	0,0349	48	1,1106	0,6691	0,7431
3	0,0524	0,9986	0,0523	49	1,1504	0,6561	0,7547
4	0,0699	0,9976	0,0698	50	1,1918	0,6428	0,7660
5	0,0875	0,9962	0,0872	51	1,2349	0,6293	0,7771
6	0,1051	0,9945	0,1045	52	1,2799	0,6157	0,7880
7	0,1228	0,9925	0,1219	53	1,3270	0,6018	0,7986
8	0,1405	0,9903	0,1392	54	1,3764	0,5878	0,8090
9	0,1584	0,9877	0,1564	55	1,4281	0,5736	0,8192
10	0,1763	0,9848	0,1736	56	1,4826	0,5592	0,8290
11	0,1944	0,9816	0,1908	57	1,5399	0,5446	0,8387
12	0,2126	0,9781	0,2079	58	1,6003	0,5299	0,8480
13	0,2309	0,9744	0,2250	59	1,6643	0,5150	0,8572
14	0,2493	0,9703	0,2419	60	1,7321	0,5000	0,8660
15	0,2679	0,9659	0,2588	61	1,8040	0,4848	0,8746
16	0,2867	0,9613	0,2756	62	1,8807	0,4695	0,8829
17	0,3057	0,9563	0,2924	63	1,9626	0,4540	0,8910
18	0,3249	0,9511	0,3090	64	2,0503	0,4384	0,8988
19	0,3443	0,9455	0,3256	65	2,1445	0,4226	0,9068
20	0,3640	0,9397	0,3420	66	2,2460	0,4067	0,9135
21	0,3839	0,9336	0,3584	67	2,3559	0,3907	0,9205
22	0,4040	0,9272	0,3746	68	2,4751	0,3746	0,9272
23	0,4245	0,9205	0,3907	69	2,6051	0,3584	0,9336
24	0,4452	0,9135	0,4067	70	2,7475	0,3420	0,9397
25	0,4663	0,9068	0,4226	71	2,9042	0,3256	0,9455
26	0,4877	0,8988	0,4384	72	3,0777	0,3090	0,9511
27	0,5095	0,8910	0,4540	73	3,2709	0,2924	0,9563
28	0,5317	0,8829	0,4695	74	3,4874	0,2756	0,9613
29	0,5543	0,8746	0,4848	75	3,7321	0,2588	0,9659
30	0,5774	0,8660	0,5000	76	4,0108	0,2419	0,9703
31	0,6009	0,8572	0,5150	77	4,3315	0,2250	0,9744
32	0,6249	0,8480	0,5299	78	4,7046	0,2079	0,9781
33	0,6494	0,8387	0,5446	79	5,1445	0,1908	0,9816
34	0,6745	0,8290	0,5592	80	5,6713	0,1736	0,9848
35	0,7002	0,8192	0,5736	81	6,3138	0,1564	0,9877
36	0,7265	0,8090	0,5878	82	7,1154	0,1392	0,9903
37	0,7536	0,7986	0,6018	83	8,1443	0,1219	0,9925
38	0,7813	0,7880	0,6157	84	9,5144	0,1045	0,9945
39	0,8098	0,7771	0,6293	85	11,4301	0,0872	0,9962
40	0,8391	0,7660	0,6428	86	14,3007	0,0698	0,9976
41	0,8693	0,7547	0,6561	87	19,0811	0,0523	0,9986
42	0,9004	0,7431	0,6691	88	28,6362	0,0349	0,9994
43	0,9525	0,7314	0,6820	89	57,2900	0,0174	0,9998
44	0,9657	0,7193	0,6947	90	infini	0,0000	1,0000
45	1,0000	0,7071	0,7071				

Nous avons maintenant tout ce qu'il faut pour calculer OB. En effet, nous pouvons écrire la proportion suivante : OB est à OE comme OA est à OD (triangles semblables OAB et ODE), ce qui s'écrit :

$$\frac{OB}{OE} = \frac{OA}{OD}$$

d'où nous tirons :

$$OB \times OD = OA \times OE \text{ et } OB = \frac{OA \times OE}{OD}.$$

Or, OD est égal à un (rayon du cercle trigonométrique), OE est par définition le cosinus de l'angle AOB, nous avons donc :

$$OB = OA \times \cos AOB \text{ ou } OB = OA \cos \varphi.$$

Donc, si nous connaissons OA et l'angle φ à l'aide de la table ci-dessus, nous aurons $\cos \varphi$ et nous pourrions calculer OB.

Un exemple fera mieux comprendre :

Une bobine de self-induction absorbe un courant $I_{\text{eff}} = 12$ ampères; le relevé à l'oscillographe (p. 55) des courbes de l'intensité et de la différence de potentiel a montré qu'il existait entre les valeurs maxima de ces quantités un décalage de 40° . Quelle est la valeur de la composante active du courant?

Nous avons :

$$OB = OA \cos \varphi.$$

Or, OA c'est I_{eff} , soit 12 ampères; le cosinus de l'angle $\varphi = 40^\circ$ est, d'après le tableau, $\cos \varphi = 0,766$, donc :

$$OB = 12 \times 0,766 = 9,2 \text{ ampères.}$$

C'est très facile comme on le voit.

Ce qui l'est moins, c'est la détermination de l'angle φ parce que l'on n'a pas toujours sous la main un oscillographe, mais on peut l'évaluer industriellement

si l'on possède un voltmètre thermique, un ampèremètre thermique et un wattmètre.

Prenons un nouvel exemple :

Un moteur à courant alternatif absorbe 53 ampères efficaces sous 110 volts efficaces; un wattmètre intercalé dans son circuit marque à ce moment 4 080 watts. Déterminer $\cos \varphi$ et l'angle φ ?

Nous dirons :

La puissance apparente est :

$$P_{\text{app}} = E_{\text{eff}} \times I_{\text{eff}} = 53 \times 110 = 5\,830 \text{ volts amp.}$$

La puissance réelle est donnée par le wattmètre, elle est :

$$P_r = 4\,080 \text{ watts}$$

Or, d'après ce que l'on a vu :

$$P_r = P_{\text{app}} \times \cos \varphi$$

d'où :

$$\cos \varphi = \frac{P_r}{P_{\text{app}}} = \frac{4\,080}{5\,830} = 0,8$$

et cherchant sur la table l'angle qui a pour $\cos \varphi$, 0,8 on trouve $\varphi = 37^\circ$.

Ce n'est pas difficile, comme on s'en rend compte, mais ne perdons pas de vue que l'essai demande à être fait avec soin, il faudra d'abord des appareils bien étalonnés, ensuite faire les trois lectures : voltmètre, ampèremètre, wattmètre *au même instant*.

Calcul du coefficient de self-induction. —

Avant de quitter les bobines de réactance, examinons comment on peut calculer le coefficient de self-inductance L d'une bobine.

Tout d'abord, nous remarquerons qu'il existe des formules établies avec soin qui permettent de dire d'avance quelle sera la valeur du coefficient L de self-inductance d'une bobine; signalons-en une en passant. Soit une bobine cylindrique creuse sans fer renfermant N spires ayant une longueur l , un rayon moyen

r et une épaisseur e (toutes ces valeurs étant évaluées en centimètres). Le coefficient de self-inductance a pour valeur approchée :

$$L_s = \frac{N^2 r^2 \times 10^7}{1,844r + 3,1 e + 3,5 l} \text{ henrys}$$

Mais nous nous hâterons d'ajouter que ce calcul est très difficile à faire exactement lorsque la bobine contient du fer; il devient alors très compliqué et mieux vaut avoir recours à une méthode pratique.

Il existe des appareils et des montages savants permettant de mesurer le coefficient de self-inductance L , mais ils ne sont pas à la portée de tout le monde, tandis que la méthode que nous allons indiquer est simple et facile à employer.

Supposons que nous ayons besoin de connaître exactement le coefficient L de self-inductance d'une bobine analogue à celle que nous avons calculée page 100.

Nous commencerons par mesurer très exactement au pont de Wheatstone par exemple (1), ou avec un accumulateur, un voltmètre et un ampèremètre, la résistance R du fil de cuivre constituant l'enroulement; c'est chose facile.

Relions ensuite cette bobine aux deux fils d'une distribution à courant alternatif ou à un alternateur dont nous connaissons la fréquence f , interposons un rhéostat, un ampèremètre à fil chaud A (fig. 42) et mettons un voltmètre thermique aux bornes de la bobine.

Nous notons une intensité I_{eff} et une tension E_{eff} ; cela suffit, car nous avons tout ce qu'il faut pour calculer le coefficient L de self-inductance.

En effet, rappelons-nous le triangle rectangle

(1) *Leçons pratiques d'électricité industrielle (Le courant continu)*, par A. SOULIER, t. I, p. 83.

de la figure 38, p. 93, nous savons que l'on a :

$$I_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

(ω peut être remplacé par $2\pi f$, voir p. 89).

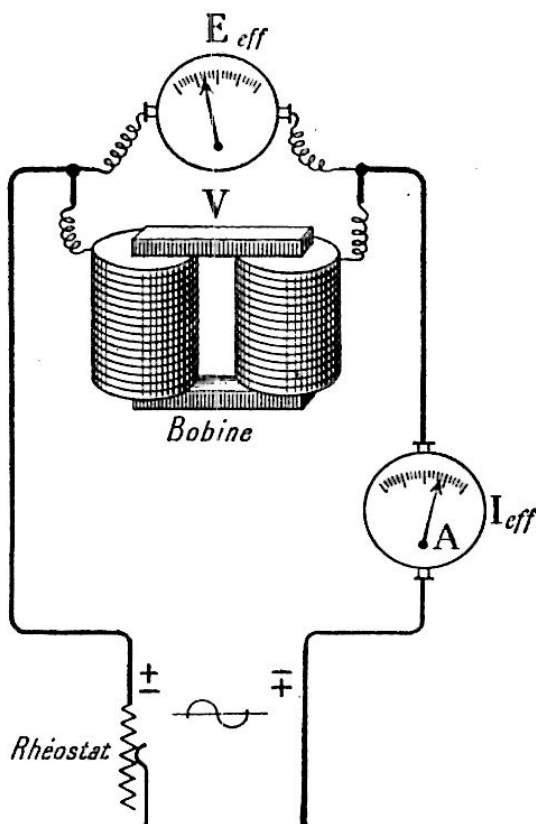


FIG. 42. — Détermination pratique du coefficient de self-inductance.

Or, dans cette formule tout est connu, sauf L , nous en tirerons donc facilement L .

Prenons un exemple, c'est le plus sûr moyen de faire comprendre la méthode :

On a intercalé un ampèremètre dans le circuit du primaire d'un transformateur alimenté par un courant alternatif à 50 périodes par seconde, il marque 2,1 ampères. Au même moment, un voltmètre disposé aux bornes mêmes de ce primaire marque 100 volts. Quelle

est la valeur du coefficient L , sachant que la résistance de l'enroulement considéré est de 4 ohms?

Nous avons :

$$I_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

ou :

$$I_{\text{eff}} \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} = E_{\text{eff}}$$

et élevant au carré :

$$I_{\text{eff}}^2 (R^2 + \omega^2 L^2) = E_{\text{eff}}^2$$

d'où on tire :

$$R^2 I_{\text{eff}}^2 + \omega^2 L^2 I_{\text{eff}}^2 = E_{\text{eff}}^2$$

et :

$$L^2 = \frac{E_{\text{eff}}^2 - R^2 I_{\text{eff}}^2}{I_{\text{eff}}^2 \omega^2}, \text{ d'où } L = \frac{\sqrt{E_{\text{eff}}^2 - R^2 I_{\text{eff}}^2}}{I_{\text{eff}} \omega}$$

et remplaçant les lettres par leur valeur :

$$L = \frac{\sqrt{100^2 - 16 \times 2,1^2}}{2,1 \times 2 \times 3,14 \times 50} = 0,15 \text{ henry.}$$

(Remarquons que $\omega = 2\pi f$, c'est-à-dire $6,28 \times 50$, ainsi que nous l'avons indiqué page 87.)

Constante de temps. — Reprenons le triangle OBC de la figure 41, que nous pourrions appeler le « triangle fondamental ».

Nous venons de voir que la projection de OA sur OF était OB qui avait pour valeur OA multiplié par le cosinus de l'angle AOB :

$$OB = OA \cos \varphi.$$

Cherchons à déterminer la composante OC. Il y a deux manières :

1° Nous savons que dans le triangle rectangle BOC :

$$BC^2 = \overline{OB}^2 + \overline{OC}^2$$

d'où :

$$OC = \sqrt{\overline{BC}^2 - \overline{OB}^2}$$

mais BC est égal à OA (diagonales d'un rectangle), donc :

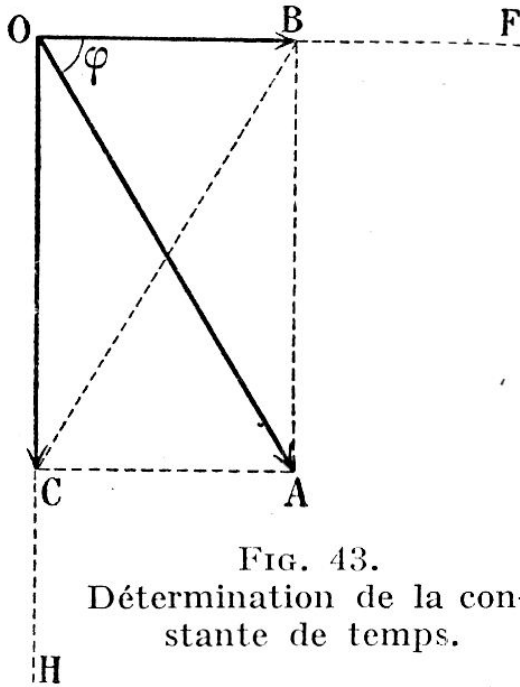


FIG. 43.

Détermination de la constante de temps.

$$OC = \sqrt{\overline{OA}^2 - \overline{OB}^2};$$

2° Nous pouvons aussi considérer OC comme la projection de OA sur la direction OH et écrire :

$$OC = OA \cos AOC.$$

Or, l'angle AOC est le complément de AOB puisque le triangle est rectangle, à eux deux ils font 90° et la trigonométrie apprend que le cosinus d'un angle est égal au sinus du complément.

Cela résulte, du reste, de l'observation du tableau de la page 106, $\sin 25^\circ = \cos 65^\circ$, etc., donc :

$$\cos AOC = \sin AOB = \sin \varphi \text{ et } OC = OA \sin \varphi.$$

La composante réactive ou magnétisante OC, de même que la composante active OB, se calculeront très simplement à l'aide d'une table de sinus et de cosinus, telle que celle de la page 106, si l'on connaît la valeur de la résultante OA, et réciproquement.

Formons le rapport de ces deux composantes $\frac{OC}{OB}$ en remplaçant par leurs valeurs, nous avons :

$$\frac{OC}{OB} = \frac{OA \sin \varphi}{OA \cos \varphi}, \text{ c'est-à-dire } \frac{OC}{OB} = \operatorname{tg} \varphi$$

puisque $\frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \operatorname{tg} \varphi.$

Mais en comparant ce triangle fondamental du courant alternatif à celui de la page 93, nous remarquons le vecteur OB qui est proportionnel à RI_{eff} , le vecteur OC à ωLI_{eff} , et la résultante OA , qui est la tension E_{eff} , est égale à $I_{\text{eff}}\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$.

Faisons le rapport $\frac{OC}{OB}$, nous avons :

$$\frac{OC}{OB} = \frac{\omega LI_{\text{eff}}}{RI_{\text{eff}}} = \text{tg } \varphi, \text{ ou } \text{tg } \varphi = \frac{\omega L}{R}.$$

L'expression $\frac{L}{R}$ est appelée la *constante de temps* du circuit, elle est importante à retenir parce qu'elle définit la valeur du retard apporté par la self-induction.

Cette formule, en effet, résume ce que nous savons déjà, c'est-à-dire que l'angle mesurant le retard de la courbe de l'intensité du courant sur celle de la différence de potentiel est d'autant plus grand que le coefficient de self-inductance L est plus grand, ce que nous avons déjà vu. De plus, ce retard est d'autant plus petit que le dénominateur R est plus grand.

D'où nous concluons que pour avoir une réactance aussi parfaite que possible, nous devons avoir L grand (beaucoup de fer, et un grand nombre de spires) et R petit, c'est-à-dire qu'il faudra employer un gros fil pour l'enroulement, ayant aussi peu de résistance que possible. Ce que nous disons se déduit du reste de l'observation du triangle fondamental, l'inclinaison du vecteur résultant dépendant uniquement de la valeur des deux composantes : c'est ce que résume la formule ci-dessus de la constante de temps.

Comment mesurer pratiquement $\cos \varphi$. — Il existe un moyen très simple pour évaluer le facteur

de puissance ou $\cos \varphi$ d'une installation ou d'un appareil, il suffit de disposer de *voltmètres, d'ampèremètres et de wattmètres* ou à défaut de wattmètres, d'un compteur électrique.

Prenons le cas le plus facile d'une installation à courants alternatifs simples ou *monophasée*. Intercalons un ampèremètre comme dans la figure 42 et disposons un voltmètre aux bornes de l'appareil ou de l'installation dont on veut mesurer le $\cos \varphi$, le produit de leurs indications donnera UI . De même, intercalons à côté de l'ampèremètre le *gros fil d'un wattmètre* et relions son *fil fin* aux mêmes points que les bornes du voltmètre, il mesurera les watts réels, c'est-à-dire $UI \cos \varphi$ et le rapport des deux donnera $\cos \varphi$.

A défaut de wattmètre on peut toujours, pour une installation, avoir recours au *compteur*. Ces appareils sont suffisamment précis pour donner une indication utile. Voici comment on peut s'y prendre avec un compteur électrique à défaut de wattmètre. Nous lirons par exemple sur la plaque du compteur :

1 tour de disque = 2 watts-heures.

Intercalons un ampèremètre tout de suite après le compteur (il suffit de le brancher à la place d'un des fusibles du coupe-circuit général) et mettons un voltmètre en dérivation sur les deux pôles du même coupe-circuit. Nous lisons par exemple : 21 ampères et 122 volts. Prenons une montre à secondes d'autre part et en regardant passer la tache noire placée sur le disque du compteur, nous comptons par exemple 8 tours de disque en 40 secondes.

Nous dirons : en *une heure* ou en 3 600 secondes, il y aura $\frac{3\ 600}{40} \times 8 = 720$ tours et à 2 watts-heures par tour, cela fait 1 440 watts-heures.

Comme le produit des indications de l'ampère-

mètre (21 ampères) par celles du voltmètre (122 volts) nous donne 2 562 volt-ampères, nous avons :

$$\cos \varphi = \frac{UI \cos \varphi}{UI} = \frac{\text{watts réels}}{\text{volt-ampères}} = 0,57 \text{ (voir p. 71).}$$

Avec des courants diphasés ou triphasés, c'est exactement la même chose, sauf que l'on emploie 2 ou 3 ampèremètres et 2 ou 3 voltmètres.

Enfin, dans certaines installations comportant un *compteur actif* qui mesure $UI \cos \varphi$ et un *compteur réactif* qui mesure $UI \sin \varphi$, il suffit de lire en même temps comme précédemment les deux compteurs, le rapport donne $\text{tg} \varphi$ et une table (p. 106) permet de retrouver $\cos \varphi$ à moins que l'on veuille le calculer à

$$\text{l'aide de la formule } \cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \varphi}}.$$

Calcul de la puissance réactive nécessaire pour le relèvement du facteur de puissance. —

Ce problème est un de ceux qui se posent le plus souvent dans les distributions d'énergie par courants alternatifs. Considérons en effet une installation électrique dont on connaît le facteur de puissance, $\cos \varphi$, soit qu'il nous ait été donné, soit qu'on l'ait mesuré comme on vient de le voir et supposons qu'on trouve ce facteur de puissance trop faible et qu'on veuille l'améliorer (par exemple pour le porter de $\cos \varphi = 0,4$ à $\cos \varphi = 0,81$).

Reprenons le diagramme de la figure 41 et soit fig. 44 le vecteur OA représentant la puissance apparente de l'installation. La puissance réelle sera $OB = OA \cos \varphi$ tandis que la puissance réactive ou magnétisante est $OC = OA \sin \varphi$. Supposons le problème résolu et φ' le nouvel angle. On voit que l'on peut avoir la même puissance réelle. OB avec un nouvel angle φ' tel que pour une puissance apparente OA' on ait encore le même puissance réelle ou active

$OB = OA' \cos \varphi'$. Pour cela il a fallu changer la puissance réactive et la faire passer de OC à OC' .

On peut écrire : *Puissance réactive* = $OA \sin \varphi$ et *Puissance active* = $OA \cos \varphi$. Divisant membre à membre, OA disparaît et il reste :

$$\frac{\text{Puissance réactive}}{\text{Puissance active}} = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \operatorname{tg} \varphi$$

d'où *Puissance réactive* = *Puissance active* $\times \operatorname{tg} \varphi$. A un autre angle φ' correspond donc une nouvelle puissance réactive égale encore à la même puissance active ou réelle multipliée par $\operatorname{tg} \varphi'$. D'où on déduit que la puissance réactive nécessaire pour faire passer l'angle de φ à φ' doit être égale à la puissance réelle, toujours la même, multipliée par $\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi'$.

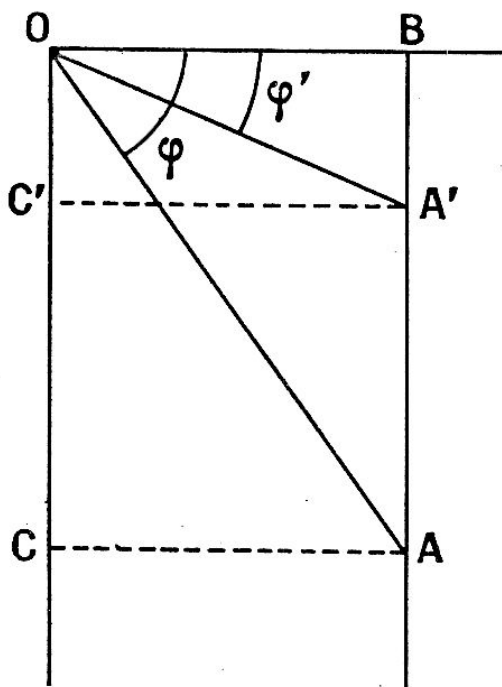


Fig. 44. — Diagramme relatif à l'amélioration du facteur de puissance

EXEMPLE. — Pour passer de $\cos \varphi = 0,4$ auquel correspond $\operatorname{tg} \varphi = 2,25$ à $\cos \varphi = 0,81$, angle dont

la $\operatorname{tg} \varphi' = 0,72$ il faudra fournir à l'aide de condensateurs ou autrement une puissance réactive représentée par la puissance réelle $\times \operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi'$ soit la puissance réelle $\times (2,25 - 0,72)$ ou la puissance réelle multipliée par 1,53.

C'est d'après cette formule qu'ont été établis les tableaux de calcul rapide du relèvement du facteur de puissance que l'on trouve dans le *Formulaire pratique d'Electricité*, par A. SOULIER, p. 209.

CHAPITRE IV

Calcul des lignes à courants alternatifs

Avec du courant continu, les lignes se calculent très simplement en tenant uniquement compte de la chute de tension RI provoquée par un courant de I ampères traversant des fils de R ohms de résistance. On obtient ainsi la perte de charge en volts. Si elle est trop grande pour l'application que l'on a en vue, on augmente la section du fil pour diminuer R et avoir une chute de tension acceptable. C'est, en somme, assez facile.

Avec les courants alternatifs il en va autrement, parce qu'il faut non seulement transmettre les courants actifs, mais aussi les courants réactifs. Sans ces derniers courants, le calcul serait aussi simple que pour le courant continu. Voilà pourquoi nous avons insisté sur la nécessité qu'il y a de chercher à avoir un facteur de puissance aussi voisin de un que possible.

C'est le cas d'un réseau alimentant uniquement des lampes, malheureusement cette circonstance se présente rarement, étant donné que les distributions d'énergie ont surtout pour but de fournir la force motrice dans les usines et les ateliers.

Il s'introduit donc, du fait de la présence des moteurs, un facteur de puissance qui dépend du nombre de moteurs alimentés, etc.

Le calcul d'une ligne alimentant à la fois des lampes et des moteurs serait presque inextricable si l'on n'avait pas un procédé pratique pour arriver au résultat. Ce procédé est basé sur l'application du théorème de M. Boucherot, ingénieur, auquel nous devons déjà la règle pratique des 2,2 volts. Ce théorème est le suivant :

Théorème de Boucherot. — *Dans un circuit parcouru par des courants alternatifs et ne comprenant ni collecteurs ni commutateurs tournants, ni résistances variables pendant la période (1), la somme algébrique des puissances magnétisantes est nulle comme la somme des puissances réelles.*

Nous donnerons tout de suite deux exemples qui feront mieux comprendre comment ce théorème s'applique et quels sont ses résultats pratiques.

PREMIER EXEMPLE. — *Dans un atelier se trouve un moteur à courant alternatif fournissant 20 chevaux sur l'arbre moteur, son rendement est de 90 p. 100 et son facteur de puissance de 0,8. Il est alimenté par un alternateur qui fournit en même temps le courant à 80 lampes à filament métallique de 50 bougies chacune éclairant l'atelier et absorbant 1 watt par bougie. La distance qui sépare l'atelier de la salle des machines où se trouve l'alternateur est de 500 mètres et la tension du courant dans l'atelier est de 100 volts. Calculer l'intensité du courant dans la ligne d'alimentation et la section des câbles pour n'avoir qu'une perte de 10 volts.*

La puissance réelle est constituée d'une part, par la puissance réelle absorbée par le moteur de 20 chevaux et, d'autre part, par la puissance prise par les lampes.

(1) Les redresseurs constituent des résistances variables pendant la période.

Nous avons :

Puissance réelle absorbée par le moteur :

$$\frac{20 \times 736}{0,90} = 16\,350 \text{ watts.}$$

Nous avons multiplié 20 chevaux par 736, pour transformer la puissance en chevaux en watts réels, et nous avons divisé par 0,90 qui est le rendement du moteur, ce qui nous donne 16 350 watts. C'est exact, puisque le moteur ne rend que les 90 p. 100 de 16 350 watts.

Puissance réelle absorbée par les lampes :

$$80 \text{ lampes} \times 50 \text{ watts} = 4\,000 \text{ watts.}$$

En courant continu, nous aurions tous les éléments du problème sous la main; en courant alternatif, nous devons calculer la puissance magnétisante, puis déduire de l'ensemble la puissance apparente en volts-ampères, ce qui nous permettra de déterminer le nombre exact d'ampères qui passera dans les fils et, par suite, la section des fils.

Puissance apparente absorbée par le moteur. — Cette puissance est telle que, multipliée par le facteur de puissance 0,8, elle donne la puissance réelle. Or, nous connaissons la puissance réelle, elle a été trouvée égale à 16 350 watts, donc la puissance apparente sera de :

$$\frac{16\,350}{0,8} = 20\,420 \text{ volts-ampères.}$$

La puissance magnétisante peut se déduire des chiffres ci-dessus de deux façons :

1° Ou bien nous pouvons utiliser la formule trouvée page 104, et écrire :

$$P_{\text{app}}^2 = P_{\text{réelle}}^2 + P_{\text{magn}}^2, \text{ d'où } P_{\text{magn}} = \sqrt{P_{\text{app}}^2 - P_{\text{réelle}}^2}$$

et dans le cas qui nous occupe :

$$P_{\text{magn}} = \sqrt{20\,420^2 - 16\,350^2} = 12\,300$$

2° Ou encore, considérant (fig. 45) le triangle fondamental, tandis que le vecteur OB correspondant à la puissance réelle est égal à $OA \cos \varphi$, le vecteur OC correspondant à la puissance magnétisante est égal à $OA \sin \varphi$.

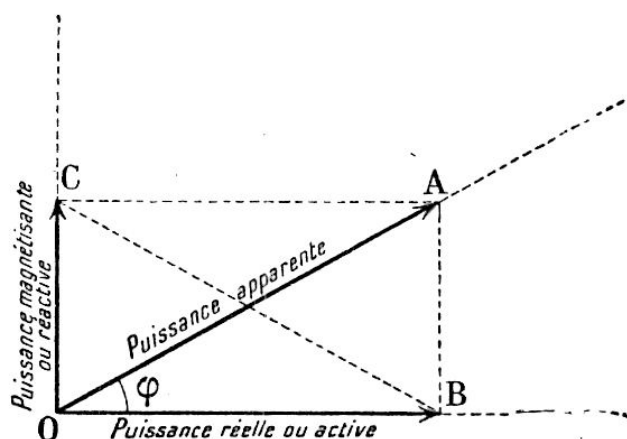


FIG. 45. — Décomposition de la puissance apparente.

Nous ne connaissons pas l'angle, mais nous connaissons le facteur de puissance $\cos \varphi = 0,8$ qui est une des données du problème.

Cherchant sur une table de cosinus l'angle qui a pour cosinus 0,8, nous trouvons $\varphi = 37^\circ$ dont le sinus est de 0,6.

Donc nous pouvons écrire :

$$P_{\text{magn}} = P_{\text{app}} \times 0,6 \text{ ou } P_{\text{magn}} = 20\,420 \times 0,6 = 12\,300.$$

Pour appliquer le théorème de Boucherot, nous formerons le tableau suivant :

	PUISSANCE réelle	PUISSANCE magnétisante	PUISSANCE apparente
Moteur .	$\frac{20 \times 736}{0,9} = 16\,350 \text{ w.}$	$\frac{20\,420}{0,6} = 12\,300 \text{ v-ar}$	$\frac{16\,350}{0,8} = 20\,420 \text{ v-a.}$
Lampes .	4 000 w.	néant	4 000 v-a.
Total...	20 350 w.	12 300 v-ar	

Il est à peine besoin de faire remarquer que les lampes étant de simples résistances sans self-inductance ne nécessitent pas de puissance magnétisante, cela simplifie les calculs.

Il nous reste à trouver la puissance apparente *résultante* qui n'est pas la somme des chiffres figurant dans la colonne « puissance apparente », comme on serait tenté de l'écrire. Non, la puissance apparente résultante est la *somme géométrique* de la puissance réelle totale et de la puissance magnétisante totale. Si l'on faisait purement et simplement la somme des chiffres de la dernière colonne, on ajouterait ensemble des vecteurs qui n'ont pas la même direction, ne l'oublions pas. Or, l'on n'est plus en droit de faire dans ce cas une somme arithmétique, comme cela arrive avec le courant continu.

Nous devons donc trouver l'hypoténuse d'un triangle rectangle qui aurait pour côtés de l'angle droit, d'une part, la puissance réelle totale, soit 20 350 watts, et d'autre part, pour l'autre côté, la puissance magnétisante totale de 12 300. Nous avons donc : $P_{app} = \sqrt{20\,350^2 + 12\,300^2} = 23\,780$ volts-ampères.

La tension dans l'atelier entre les deux fils étant de 100 volts, l'intensité correspondante sera de :

$$\frac{23\,780}{100} = 237,8 \text{ ampères.}$$

Section des fils. — Si nous admettons dans les câbles une perte maximum de 10 volts, la ligne ayant $2 \times 500 = 1\,000$ mètres, il faudra prévoir pour 238 ampères une section de 400 *millimètres carrés*.

REMARQUE. — Nous avons choisi cet exemple à dessein pour montrer l'avantage des courants alternatifs pour les transports d'énergie. La section que nous venons de trouver de 400 millimètres carrés

est assez considérable et la ligne double de 500 mètres coûtera cher, car elle représentera un poids de cuivre de 3 000 kilogrammes.

Prenons un alternateur donnant 1 000 volts, il ne sera guère plus cher qu'un alternateur 110 volts, et mettons à l'arrivée dans l'atelier un transformateur permettant de passer de la tension de 1 000 volts à la tension de 100 volts. Le courant dans la ligne, si nous négligeons les pertes dans le transformateur, ne sera plus que de $\frac{23\,780}{1\,000} = 23,78$ ampères : un fil beaucoup moins gros suffira.

Si nous prenons du fil de 6 millimètres de diamètre, nous n'aurons besoin que de 251 kilogrammes de cuivre, soit plus de 10 fois moins que précédemment. Avec du courant continu la chose n'aurait pas été possible, car on ne possède pas de transformateurs aussi simples et à un aussi bon rendement que les transformateurs à courants alternatifs.

L'ennui des courants alternatifs réside plutôt dans la complication des calculs, mais on peut s'en tirer assez facilement, comme nous venons de le voir. Un autre exemple fera mieux comprendre.

DEUXIÈME EXEMPLE. — *Un réseau à courant alternatif alimente un transformateur sur lequel sont branchés divers appareils :*

1° *Un premier moteur asynchrone de 20 000 volts-ampères, facteur de puissance + 0,9 (décalage en arrière);*

2° *Un deuxième moteur asynchrone de 5 000 volts-ampères, facteur de puissance + 0,8 (décalage en arrière);*

3° *Un moteur synchrone surexité de 10 000 volts-ampères; facteur de puissance + 0,8 (décalage en avant);*

4° *Des lampes à incandescence représentant une puissance de 10 000 watts;*

5° *Une batterie de condensateurs de 2 700 volts-ampères; (décalage entièrement en avant).*

Quelle est la puissance réelle et la puissance apparente à fournir aux bornes du transformateur? Enfin, quel est le facteur de puissance du réseau ainsi constitué?

REMARQUE. — Avant de chercher à résoudre le problème qui correspond à un cas très général, rappelons qu'un moteur synchrone, surexcité (1) se comporte comme un condensateur, le courant qu'il absorbe est décalé *en avant* de la différence de potentiel, ce qui est avantageux puisque cela permet de compenser le décalage en arrière introduit par les moteurs asynchrones ordinaires. L'angle de décalage étant en sens inverse, le sinus correspondant est négatif de même pour les condensateurs. Ceci rappelé, cherchons à résoudre la question, qui paraît compliquée. Pour appliquer le théorème de M. Boucherot, formons un tableau comme précédemment des puissances apparentes, réelles et magnétisantes. Pour le calcul de ces dernières, nous nous souviendrons que

$$P_{\text{mag}} = P_{\text{app}} \times \sin \varphi$$

Les données du problème comportant les facteurs de puissance $\cos \varphi$, la valeur de $\sin \varphi$ s'en déduit. En consultant le tableau de la page 106, nous aurons :

APPAREILS desservis	Puissance apparente en volts-ampères	$\cos \varphi$	Puissance réelle $P_{\text{app}} \times \cos \varphi$	$\sin \varphi$	Puissance magnétisante $P_{\text{app}} \times \sin \varphi$
1 ^{er} moteur asynchrone	20 000	0,9	18 000	+0,439	8 780
2 ^e moteur asynchrone	5 000	0,8	4 000	+0,6	3 000
Moteur synchrone	10 000	0,8	8 000	—0,6	— 6 000
Lampes	10 000	1	10 000	0	0
Condensateurs.	2 700	0	0	—1	— 2 700
			40 000		3 080

(1) Voir les *Moteurs électriques*, par A. SOULIER, Garnier, éditeur.

La *puissance réelle* totale est de 40 000 watts. (Nous avons ici le droit de faire la somme arithmétique des puissances réelles, puisqu'elles correspondent à un vecteur de même direction.)

La *puissance magnétisante* totale est de 3 080 vars, la raison ci-dessus s'applique aux éléments de cette puissance qui sont tous alignés sur le même vecteur, mais ici, il y a une partie constituée par des vecteurs positifs, $8\,780 + 3\,000 = 11\,780$, et une autre partie constituée par des vecteurs négatifs, $-6\,000$ et $-2\,700$, soit $-8\,700$ (2). Le vecteur résultant, $11\,780 - 8\,700 = 3\,080$, constitue la composante magnétisante du courant résultant.

La puissance apparente résultante sera donc de :

$$P_{\text{app}} = \sqrt{40\,000^2 + 3\,080^2} = 40\,050 \text{ volts ampères}$$

Le facteur de puissance résultant sera :

$$\cos \varphi = \frac{P_r}{P_{\text{app}}} = \frac{40\,000}{40\,050} = 0,99.$$

La pratique montre que le premier exemple se rencontre plus facilement que le second, cependant ce dernier est intéressant parce qu'il fait bien voir l'influence avantageuse de la présence de condensateurs et de moteurs synchrones surexcités dans un réseau desservant des moteurs asynchrones. Tandis qu'avec ces derniers seuls, on finit par avoir un mauvais facteur de puissance, rien qu'en ajoutant des condensateurs ou un puissant moteur synchrone surexcité on arrive à faire remonter le facteur de puissance au voisinage de l'unité.

(2) La chose s'explique par le fait que le moteur synchrone surexcité aussi bien que les condensateurs *fournissent* du courant magnétisant au lieu d'en absorber.

La puissance magnétisante dont ils sont le siège vient donc en déduction de la puissance magnétisante totale à fournir, voilà pourquoi on doit la retrancher.

CHAPITRE V

Calcul des circuits avec condensateurs

L'exemple précédent a mis en lumière les avantages que présente l'emploi des condensateurs sur un réseau à courant alternatif. Nous ne quitterons pas ce sujet sans examiner comment on peut évaluer le courant absorbé par un condensateur.

Circuits avec capacité seule. — Nous savons que si l'on soumet un condensateur à une différence de potentiel alternative, les armatures se chargent et se déchargent et tout l'ensemble se comporte comme si un courant alternatif circulait dans le condensateur. Dans ces conditions, il est évident que si l'on intercale un ampèremètre en série avec un condensateur soumis à une différence de potentiel alternative, la déviation de l'aiguille sera d'autant plus grande que les armatures auront une plus grande étendue ou plutôt que le condensateur aura plus de capacité. De plus, cette intensité de courant augmentera avec la rapidité avec laquelle se succèdent les inversions de courant, car plus nombreuses seront dans ce cas les charges et décharges du condensateur. Enfin, plus la tension elle-même sera élevée et plus la quantité $Q = CE$ emmagasinée à chaque charge sera considérable, elle circulera en sens contraire à la décharge, et comme l'intensité d'un courant

dépend de la quantité d'électricité qui passe dans un temps donné, cette intensité sera encore ici proportionnelle à la force électromotrice appliquée au condensateur.

Nous pourrions donc écrire, si ω représente, comme à propos de la self-inductance, la vitesse d'un mobile suivant les variations du courant sur le cercle trigonométrique :

$$I_{\text{eff}} = \omega \times C \times E_{\text{eff}}.$$

Or, nous savons (p. 89) que $\omega = 2\pi f$, f étant la fréquence du courant en périodes par seconde, nous aurons donc :

$$I_{\text{eff}} = 2\pi f \times C \times E_{\text{eff}}.$$

Un exemple fera mieux comprendre l'application de cette formule.

EXEMPLE. — *On a monté en parallèle ou en quantité 100 condensateurs de 2 microfarads chacun de capacité (du modèle des réseaux téléphoniques à batterie centrale), et on a relié les deux pôles de la batterie ainsi constituée à un réseau à courant alternatif à 110 volts et 50 périodes par seconde. On demande l'intensité du courant fourni par le réseau à la batterie en question et la puissance apparente qu'elle absorbe.*

Nous avons :

$$I_{\text{eff}} = 2\pi f \times C \times E.$$

Remplaçons les lettres par leur valeur : $f = 50$, $E = 110$ et $C = 100 \times 2 = 200$ microfarads :

$$I_{\text{eff}} = 6,28 \times 50 \times 200 \times 110$$

et en effectuant :

$$I_{\text{eff}} = 6,9 \text{ ampères.}$$

La puissance apparente est de $6,9 \times 110 = 759$ volts-ampères.

Circuits comportant de la self-inductance et de la capacité. — Reprenons la formule ci-dessus :

$$I_{\text{eff}} = \omega C E_{\text{eff}}.$$

Nous en tirons $E_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{eff}}}{\omega C}$, ce que l'on peut écrire

$$E_{\text{eff}} = \frac{1}{C\omega} \times I_{\text{eff}}.$$

Or, nous nous souvenons que la force contre-électromotrice de self-inductance produite par un courant I_{eff} traversant une réactance L avec une pulsation ω est :

$$E_{\text{eff}} = \omega L I_{\text{eff}}.$$

Cette formule est identique à la précédente, sauf en ce que $\frac{1}{\omega C}$ est remplacé par ωL . On en a déduit que lorsqu'un circuit présente à la fois de la self-inductance et de la capacité, la différence de potentiel mise en jeu est de la forme :

$$E_{\text{eff}} = I_{\text{eff}} \times \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)$$

Il en résulte que la formule s'appliquant au cas le plus général qui est celui où les circuits présentent de la *résistance*, de l'*inductance* et de la *capacité* est :

$$E_{\text{eff}} = I_{\text{eff}} \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}$$

d'où :

$$I_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}}$$

Cette formule paraîtra compliquée parce qu'elle est générale, elle convient en effet à tous les cas :

1° Faisons $C = 0$ (capacité nulle), nous avons :

$$I_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

qui est la formule de la page 98 applicable aux circuits à self-inductance :

2° Si $L = 0$ (self-inductance nulle), la formule devient :

$$I_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}}$$

et si dans ce cas $R = 0$, on a $I_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{\frac{1}{\omega C}}$, ou $I_{\text{eff}} =$

$\omega C E_{\text{eff}}$, nous retrouverons la formule de la page précédente;

3° Enfin, si l'on s'arrange pour que $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, le terme entre parenthèses s'annule et il reste :

$$I_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{R}$$

c'est-à-dire que nous retrouvons la loi d'Ohm.

Ce cas est particulièrement intéressant, quand $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, ou quand la capacité compense complètement la self-inductance, on dit qu'il y a *résonance*; si la résistance R est faible, l'intensité peut prendre des valeurs considérables. Le phénomène de résonance est utilisé en T. S. F., mais en général dans les installations industrielles on cherche à l'éviter parce que les effets qui en résultent sont souvent désastreux.

Nous terminerons cette étude sur le calcul des circuits à courants alternatifs en montrant l'application de la formule ci-dessus.

PROBLÈME. — Une bobine de réactance pour laquelle $L = 2$ henrys et $R = 1$ ohm est montée en série avec un condensateur de capacité $C = 10$ microfarads. Les extrémités du circuit ainsi constitué sont reliées aux deux bornes d'un alternateur fournissant du courant alternatif à la tension efficace $E_{\text{eff}} = 120$ volts et à la fréquence 50. Quelle est : 1° l'intensité dans le circuit; 2° la différence de potentiel aux bornes de la self-induction et à celles du condensateur?

Nous avons :

$$I_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

soit, en remplaçant les lettres par leur valeur :

$$I_{\text{eff}} = \frac{120}{\sqrt{1 + \left(2 \times 3,14 \times 50 \times 2 - \frac{1}{2 \times 3,14 \times 50 \times 0,00001}\right)^2}}$$

et en effectuant : $I_{\text{eff}} = 0,39$ ampère.

Aux bornes de la self-inductance, nous aurons une tension :

$$e_s = I_{\text{eff}} \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$$

soit :

$$e_s = 0,39 \sqrt{1 + (2 \times 3,14 \times 50 \times 2)^2} = 245 \text{ volt}$$

et aux bornes du condensateur :

$$e_s = \frac{I_{\text{eff}}}{\omega C} = \frac{0,39}{2 \times 3,14 \times 50 \times 0,00001} = 124 \text{ volts.}$$

Ainsi donc, la tension de départ de 120 volts fournie par l'alternateur provoque le passage d'un courant de 0,39 ampère, à travers l'inductance et la capacité, lequel détermine une tension de 245 volts aux bornes de la self-inductance et 124 volts aux bornes du condensateur.

C'est la confirmation par le calcul du phénomène signalé page 39, à propos des phénomènes dus aux capacités et self-inductances et de la curieuse manière dont procède le courant alternatif pour faire ses additions. Dans le cas présent, la tension de 245 volts de la self-inductance ajoutée à la tension de 124 volts du condensateur donne pour résultat 120 volts ! Nous avons oublié de dire qu'il s'agissait d'une somme géométrique, d'une somme de vecteurs (voir le diagramme fig. 25); le courant alternatif n'en connaît pas d'autres et laisse au courant continu le soin d'utiliser les sommes arithmétiques.

TROISIÈME PARTIE
LES COURANTS ALTERNATIFS
POLYPHASÉS

CHAPITRE PREMIER

Courants diphasés

L'industrie emploie aujourd'hui surtout des courants alternatifs polyphasés et en particulier des courants *triphases*; la raison qui a dicté ce choix réside surtout dans la plus grande facilité de mise en marche des moteurs que procurent ces courants.

Est-ce à dire que les courants alternatifs simples dits « monophasés » dont nous venons d'examiner les propriétés, soient impropres à l'emploi des moteurs? Ce serait aller un peu loin, car on construit aujourd'hui de bonnes machines utilisant ces courants alternatifs simples; nous reconnâtrons cependant que les moteurs à courant alternatif simple sont un peu plus compliqués et plus chers à puissance égale que les moteurs triphasés, ce qui a assuré la vogue de ces derniers.

L'expression de *courants alternatifs polyphasés*

signifie qu'il s'agit de courants alternatifs à plusieurs phases, et il est de fait qu'une distribution d'énergie électrique à courants polyphasés est constituée par plusieurs fils transmettant chacun des courants alternatifs identiques à ceux dont nous venons d'examiner les propriétés, mais dont les maxima n'ont pas lieu en même temps. C'est ainsi que, sur les trois fils d'un réseau triphasé, il circule sur chacun d'eux un courant alternatif, mais ces trois courants n'ont pas leur maximum au même instant. Le courant est maximum à un certain moment dans le fil 1, puis un tiers de période après, il est maximum dans le fil 2 et un tiers de période après, c'est le tour du fil 3, et ainsi de suite.

Il en résulte que l'étude de ces courants, qui pourrait paraître à première vue très difficile, n'est plus rien si l'on connaît bien les propriétés du courant alternatif simple que nous venons d'examiner. Chaque fil d'une distribution triphasée étant parcouru en somme par un courant alternatif simple est le siège des mêmes phénomènes (décalage de l'intensité sur la différence de potentiel, puissance apparente, etc.) que ceux que nous avons passés en revue; nous n'aurons pas à y revenir et nous examinerons simplement les propriétés que communiquent aux moteurs et appareils d'utilisation la juxtaposition de ces divers courants. Théoriquement, on peut employer un nombre quelconque de phases; c'est ainsi que le courant continu de la machine dynamo-électrique est obtenu par l'ingénieuse réunion de courants alternatifs comportant autant de phases que l'induit comporte de bobines. Pratiquement, les distributions d'énergie électrique à courants polyphasés se font soit avec des *courants alternatifs diphasés*, soit avec des *courants alternatifs triphasés*. Des courants alternatifs hexaphasés sont bien employés sur certaines commutatrices, mais il n'y a pas de distribution à

proprement parler de ces courants qui nécessiteraient trop de fils. Ces courants proviennent de transformateurs triphasés spécialement organisés à cet effet, et se rendent de là aux bagues de la commutatrice.

Courants diphasés. — Imaginons deux alternateurs ou, plus simplement, deux magnétos dans le genre de celles que l'on utilise pour l'appel sur les circuits téléphoniques et supposons qu'elles soient mises en marche à un quart de période d'intervalle. Si nous supposons qu'elles travaillent chacune sur un circuit distinct, nous aurons dans chaque circuit un

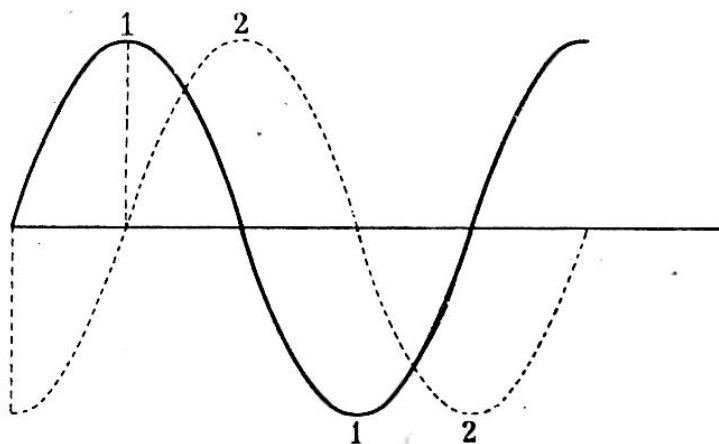


FIG. 46. — Courbes de courants diphasés.

courant alternatif simple, mais si nous pouvions voir se succéder les courants dans les deux circuits, nous percevrions deux courbes identiques (fig. 46) mais se succédant à un quart de période d'intervalle. Nous dirons que l'ensemble de ces deux circuits est parcouru par des courants alternatifs diphasés.

Mais pourquoi ces deux générateurs et ces quatre fils, solution bien compliquée à première vue du transport de l'énergie à distance? C'est ici que se place un fait d'expérience.

Champ tournant. — Relions le premier circuit

à un cadre en bois ou en carton (fig. 47), sur lequel nous aurons enroulé un fil conducteur isolé, le deuxième circuit à un cadre identique ayant même axe, mais faisant un angle de 90° avec le premier. Disposons une aiguille aimantée mobile sur un axe au centre de l'ensemble des deux cadres, et si la fréquence de nos courants alternatifs n'est pas trop grande, nous la verrons tourner toute seule.

De là à réaliser un moteur il n'y a qu'un pas. Nous remplacerons l'aiguille aimantée par une sorte d'induit, c'est-à-dire par un bloc de fer autour duquel nous disposerons un enroulement fermé sur lui-même. Les courants induits dans cet enroulement aimanteront

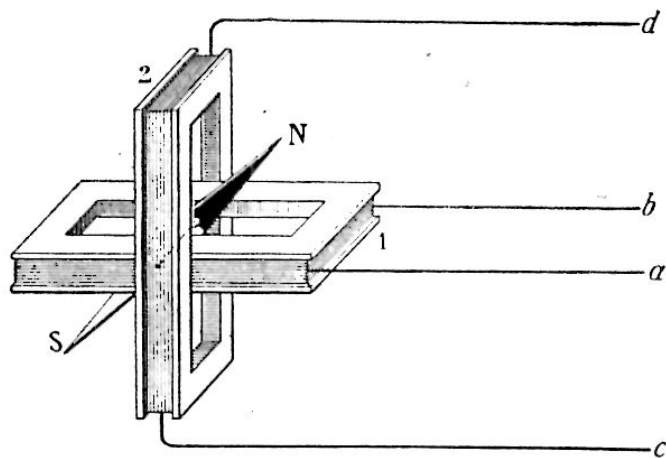


FIG. 47. — Effet des courants diphasés sur une aiguille aimantée.

le noyau de fer qui se mettra à tourner à la façon de l'aiguille aimantée de tout à l'heure.

Le moteur ainsi réalisé sera le plus simple que l'on puisse imaginer, car il n'aura ni collecteur, ni organe compliqué : un cylindre porté par deux paliers et c'est tout.

Voilà tout le secret de la vogue des courants polyphasés; on a pu réaliser avec eux des moteurs marchant au fond de l'eau ou logés en des endroits inaccessibles. On conçoit très bien, en effet, qu'avec des

enroulements bien isolés et des paliers bien graissés, un tel moteur puisse marcher presque indéfiniment.

Par quel mécanisme, dira-t-on, l'aiguille aimantée se met-elle à tourner? Par l'action d'un champ tournant, dirons-nous, et ce champ tournant est procuré par les courants polyphasés.

Avec un peu de réflexion on conçoit assez bien qu'il en soit ainsi. Considérons, en effet, le premier cadre au moment où le courant alternatif qu'il reçoit, parti de zéro, commence à croître; l'aiguille aimantée placée en son centre tendra à se mettre en croix avec lui : c'est l'expérience d'Ersted. Lorsque le courant sera maximum dans ce cadre, l'effet sur l'aiguille sera aussi maximum. A ce moment le courant est nul dans l'autre cadre, puisque ces courants sont décalés d'un quart de période; mais peu à peu, à mesure que le courant décroîtra dans le premier cadre, il augmentera dans le deuxième, et l'aiguille étant de moins en moins sollicitée par le premier et de plus en plus déviée par le deuxième, tournera d'un quart de tour. Puis le courant changera de sens dans le premier cadre et s'affaiblira dans le deuxième.

L'aiguille sera de nouveau sollicitée par le premier cadre, mais en sens inverse; comme le deuxième cadre lui a déjà fait faire un quart de tour, elle sera reprise par le premier qui lui fera faire un nouveau quart de tour; elle aura alors fait un demi-tour au total et ainsi de suite. Ces séries d'impulsions la feront tourner tout comme si un aimant mobile placé à l'extérieur l'entraînait dans sa rotation.

Tout se passe donc comme s'il y avait à l'intérieur des cadres un champ magnétique tournant; de là le nom de *moteurs à champ tournant* donné à ces appareils.

Analogie mécanique. — Nous ne pouvons mieux faire que de comparer l'action de nos cadres à celle

de deux machines à vapeur actionnant le même arbre et la même manivelle, mais avec leurs cylindres placés à angle droit (fig. 48).

Chaque machine ou chaque piston possède un mouvement alternatif, de même que chaque cadre recevant un courant alternatif produit un champ

magnétique alternatif. Mais, les mouvements de chaque piston sont décalés de 90° , c'est-à-dire, puisqu'ils actionnent la même manivelle, que lorsque l'un d'eux est au milieu de sa course (courant maximum dans le cadre), l'autre est au point mort (courant nul dans le cadre). De cette

façon, il y a toujours un cylindre qui agit et la machine n'a pas de

point mort, elle démarre dans toutes les positions. C'est aussi le cas du moteur diphasé.

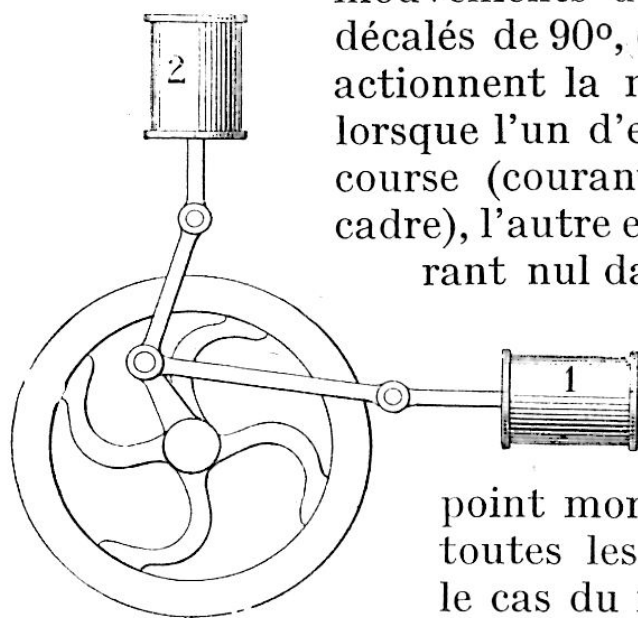


FIG. 48. — Mécanisme des courants diphasés.

Un autre exemple, connu de tout le monde, nous est donné par la locomotive à vapeur. Sur les locomotives à vapeur

les cylindres marchent par paire, mais si l'on examine une de ces machines à l'arrêt, surtout lorsque les cylindres sont sur les côtés, on voit que lorsqu'un cylindre a son piston et sa manivelle au point mort, celui qui est de l'autre côté est au milieu de sa course. Donc, si le mécanicien envoie de la vapeur dans les cylindres en ouvrant son régulateur, le premier cylindre ne donnera pas; au contraire, le deuxième, qui est au point le plus favorable, actionnera la manivelle et la locomotive démarrera. Puis, ce sera le deuxième cylindre qui sera au point mort tandis que le premier produira

l'effort maximum, et ainsi de suite. La vapeur agira tantôt sur la face avant des pistons, tantôt sur la face arrière, comme le courant alternatif qui produit dans chaque cadre un champ magnétique tantôt dirigé dans un sens et tantôt dans l'autre.

REMARQUE. — Remarquons en passant que les machines à vapeur à un seul cylindre ne peuvent démarrer lorsqu'elles s'arrêtent au point mort; il faut les pousser, soit à la main, soit par un petit moteur auxiliaire. De même, les moteurs à courant alternatif simple ne démarrent pas facilement, il faut utiliser un enroulement supplémentaire dans lequel on envoie du courant pris lui aussi sur le réseau, mais décalé à l'aide d'une bobine de réactance; on réalise ainsi un mauvais champ tournant diphasé qui entraîne l'induit.

Montages utilisés avec les courants diphasés.

— Nous avons dit que l'on pouvait réaliser des courants diphasés à l'aide de deux alternateurs ou de deux magnétos, dont les induits enverraient leurs courants dans les fils de ligne à un quart de période d'intervalle. En réalité, on prend un alternateur identique à un alternateur ordinaire monophasé et on loge entre deux bobines consécutives de l'induit un deuxième enroulement identique au premier dont les extrémités aboutissent à deux bornes séparées.

C'est comme si l'on avait réuni deux alternateurs dans une même carcasse utilisant le même inducteur. Il est évident que chaque pôle de l'inducteur passera successivement devant les bobines induites du premier enroulement, puis devant celles du deuxième. Dans chacun de ces enroulements prendront naissance des courants alternatifs, mais ces courants seront décalés l'un par rapport à l'autre d'un quart de période. Nous aurons donc 4 fils de ligne formant

deux circuits, que nous pourrions relier à des moteurs portant également 4 bornes correspondant à deux circuits distincts comme ceux de nos cadres d'expérience.

Ce montage n'est cependant pas le seul que l'on puisse réaliser.

Montage en étoile. — Tout d'abord, nous pouvons relier ensemble le milieu de l'enroulement de nos

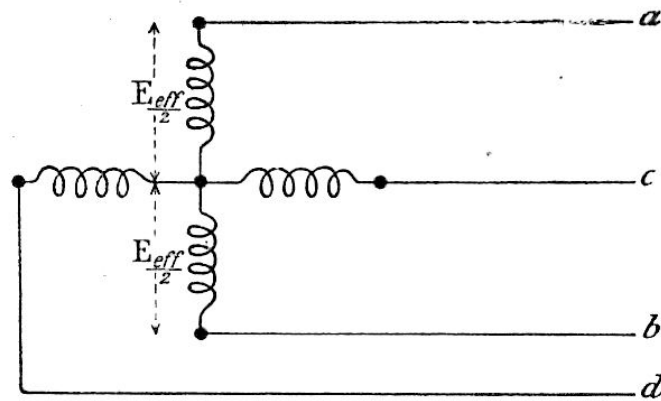


FIG. 49. — Montage étoile d'appareils à courants diphasés.

deux cadres (fig. 49); le point commun ainsi obtenu porte le nom de « point neutre ». C'est un montage de ce genre qui est réalisé dans certains quartier de Paris où l'on distribue des courants diphasés à 220 volts entre fils et à 110 volts entre chacun des fils et le point neutre, la fréquence commune aux deux circuits constituant la distribution diphasée étant de 50 périodes par seconde.

Les distributions diphasées dans les rues de Paris sont en général à 5 fils.

Entre les fils principaux de phase, il y a, avons-nous dit, 220 volts, le cinquième fil est un fil neutre relié aux points neutres de transformateurs qui comportent eux-mêmes deux enroulements, comme notre

moteur, un pour chaque phase. Ce fil neutre sert à l'éclairage, les lampes étant reliées à ce fil neutre et à un quelconque des 4 fils de phase. On alimente ainsi les lampes sous 110 volts, tout en conservant 220 volts pour les moteurs, et l'on a l'avantage d'avoir des à-coups moindres sur les lampes, en utilisant le fil neutre, que si elles étaient branchées directement sur les fils de phase.

Nous ne discuterons pas la question qui peut se

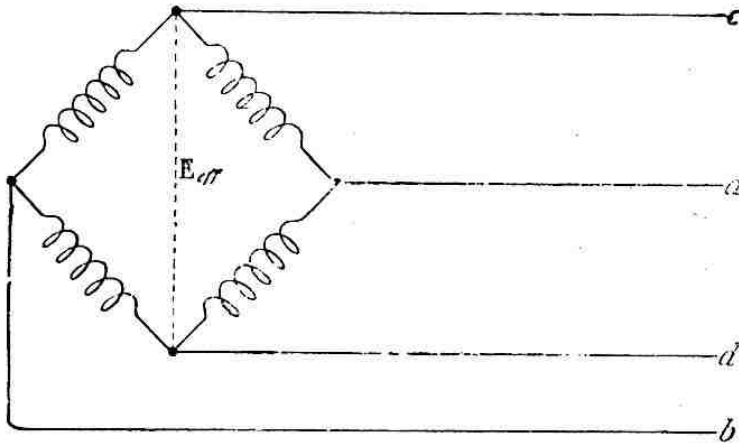


FIG. 50. — Montage polygonal de circuits à courants diphasés.

poser sur la nécessité de canaliser des courants diphasés à cinq fils, tandis que l'on peut arriver sensiblement au même résultat avec des courants triphasés de beaucoup plus répandus, et nous examinerons, sans nous y appesantir, quelques autres montages utilisés avec les courants diphasés.

Montage polygonal. — Nous l'appellerons ainsi par suite de sa forme. C'est, en somme, un montage en carré.

Relions (fig. 50) les fils de phase voisins par des enroulements égaux et nous aurons un montage rappelant le montage en triangle des courants tripha-

sés. Ici nous n'avons plus de point neutre. Si E_{eff} est la tension alternative entre fils diamétralement opposés, elle sera $\frac{E_{\text{eff}}}{\sqrt{2}}$ entre fils voisins : cela se déduit des propriétés du carré dont la diagonale est égale au côté multiplié par $\sqrt{2}$.

Réduction à trois du nombre des fils. — Dans une distribution diphasée à circuits indépendants, on peut réduire à trois le nombre des fils, mais dans

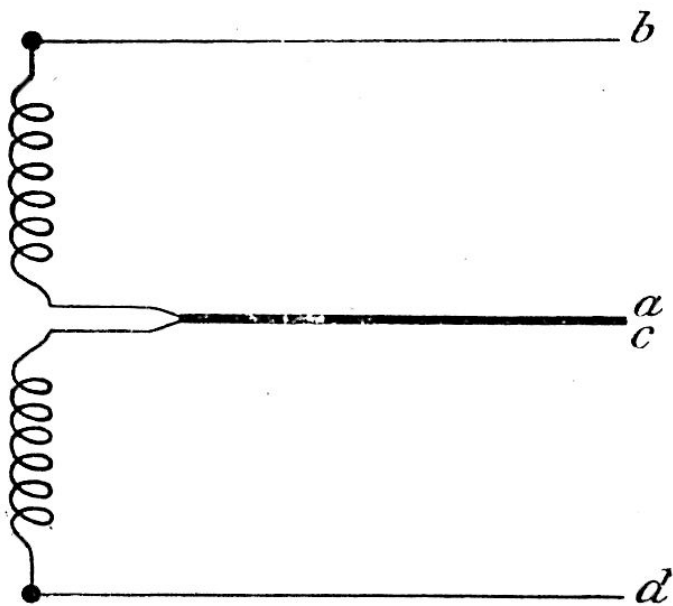


FIG. 51. — Réduction à 3 du nombre des fils.

ce cas le fil commun aux deux phases devra avoir une section plus grande que chacun des deux autres. Le calcul montre que si le courant I_{eff} circule dans les deux fils simples, le fil commun devra être prévu pour supporter un courant tel que $I_{\text{eff}} \times \sqrt{2}$. En effet :

La résultante de deux courants ou de deux vecteurs égaux à angle droit est la diagonale du carré ainsi formé. Or, chaque côté du carré ou chaque composante étant égale à I_{eff} , la diagonale ou résultante est $I_{\text{eff}}\sqrt{2}$.

Ce montage (fig. 51) est toutefois rarement employé comme du reste les distributions diphasées que remplacent avec avantage les distributions triphasées.

Montage des moteurs. — Nous ne nous attardons pas davantage sur les courants diphasés, que nous n'avons voulu citer que pour mémoire. Ils sont d'ailleurs si peu appréciés, que dans bien des ateliers desservis par des distributions publiques de courants diphasés on a installé des transformateurs système Scott (voir p. 189) permettant de passer des courants diphasés aux courants triphasés, plus commodes comme pose de fils et nécessitant des moteurs légèrement moins chers à puissance égale.

Les moteurs diphasés comportent presque toujours 4 bornes; ils sont donc faciles à reconnaître. Ces quatre bornes correspondent généralement à deux circuits séparés que l'on indique en les marquant par une accolade. Il suffit de relier ces 4 bornes aux 4 fils de la distribution pour que le moteur se mette en marche, si toutefois les phases correspondent bien aux bornes. Dans le cas où, les indications étant effacées, on aurait relié une borne formant l'extrémité d'un des enroulements avec un des fils de phase et l'autre fil de la même phase avec une des bornes du deuxième enroulement, aucun courant ne passera si les enroulements sont bien distincts et le moteur ne tournera pas. Il suffira d'intervertir les fils, c'est-à-dire de mettre le fil de phase qui allait à l'enroulement n° 2 sur une des bornes de l'enroulement n° 1, l'autre borne de ce même enroulement conservant le fil qui lui avait été relié pour voir le moteur se mettre en marche. Le rotor de tous ces moteurs comporte généralement trois bagues que l'on relie à un rhéostat triphasé; il n'y a de ce côté aucune différence avec les moteurs triphasés.

Inversion du sens de marche. — Pour inverser le sens de marche d'un moteur diphasé, il suffit d'intervertir les fils de l'une des phases quelle qu'elle soit.

Production des courants diphasés. — Les courants diphasés peuvent être obtenus, ainsi que nous l'avons vu, avec des alternateurs formés par la réunion, dans une même carcasse, de deux enroulements monophasés, distincts, ou dans les laboratoires à l'aide d'une dynamo à courant continu sur l'induit de laquelle on choisit 4 points que l'on relie à 4 bagues isolées. Si l'on a une machine bipolaire à anneau Gramme, on prend 4 points sur cet induit formant les sommets du carré inscrit et on les relie à 4 bagues.

Réciproquement, une telle machine peut servir à convertir des courants diphasés en courant continu, c'est alors une commutatrice. Si E_{eff} est la tension alternative entre bagues, c'est-à-dire correspondant aux côtés du carré, la tension obtenue entre les points diamétralement opposés correspondant à la diagonale du carré est $E_{\text{eff}}\sqrt{2}$ et la tension maxima correspondante est $E_{\text{eff}} \times \sqrt{2} \times \sqrt{2}$, soit $2 E_{\text{eff}}$. Or, la tension maxima est celle que recueille le collecteur à courant continu. Si donc, la commutatrice est alimentée par des courants diphasés à 220 volts entre fils, il y aura entre les balais du côté continu une tension de $2 E_{\text{eff}} = 440$ volts.

Les alternateurs qui produisent industriellement les courants diphasés sont en tous points semblables aux alternateurs monophasés. Une couronne ou volant, monté le plus souvent sur l'arbre même de la machine à vapeur ou de la turbine, porte une série de pôles alternativement « nord » et « sud ». Ces pôles tournent à l'intérieur d'un anneau formé de tôles en fer doux, portant des encoches comme

l'induit des dynamos à courant continu. Dans ces encoches, on loge des fils de cuivre isolés constituant le bobinage induit.

S'il s'agit d'un alternateur monophasé (fig. 52), il y a autant d'encoches ou de groupes d'encoches que de pôles, en sorte que, lorsque les pôles se déplacent sous l'action du moteur qui les entraîne, ils provoquent, par induction, une force électromotrice alternative dans les fils devant lesquels ils passent. Tous les pôles N, par exemple, passant en même temps devant une série d'encoches, les fils de ces encoches seront le siège d'une force élec-

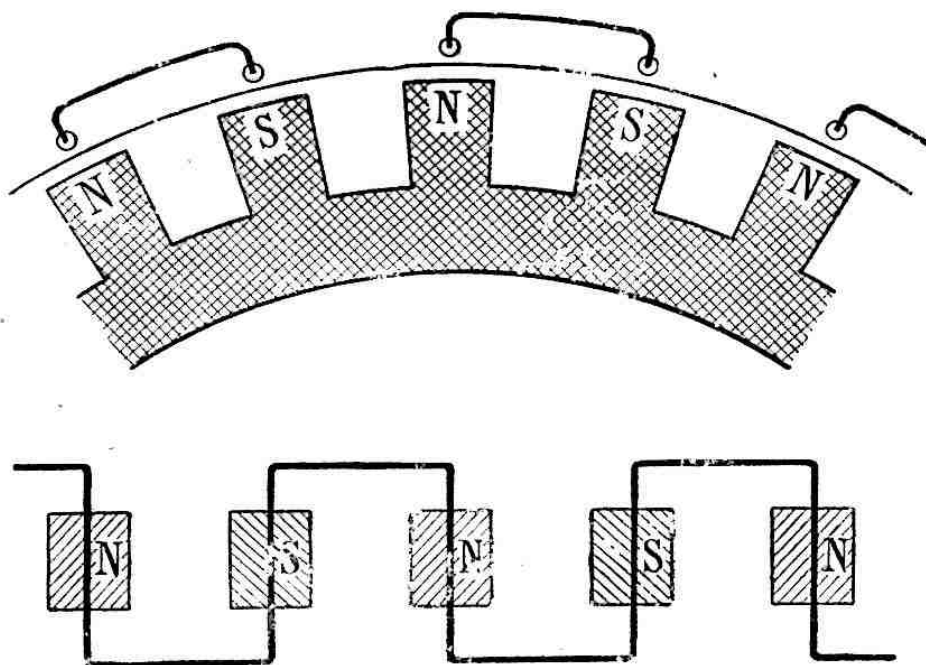


FIG. 52. — Schéma d'un alternateur simple.

tromotrice de sens identique, on pourra donc les accoupler ensemble comme des piles donnant la même force électromotrice. De même pour les encoches devant lesquelles passent les pôles S. Puis, par suite du déplacement des pôles, les premières encoches reçoivent l'influence des pôles S

et les deuxièmes celles de pôles N, et ainsi de suite; le courant est donc forcément alternatif.

Supposons qu'au milieu de l'intervalle séparant les deux encoches ci-dessus on pratique dans le fer une nouvelle série d'encoches (fig. 53) dans lesquelles nous mettrons un bobinage identique au premier. Nous aurons dans cet enroulement comme dans le premier un courant alternatif quand les pôles se mettront en mouvement. Mais, le courant alternatif de ce dernier enroulement se produira après le premier à un quart de période d'intervalle du premier.

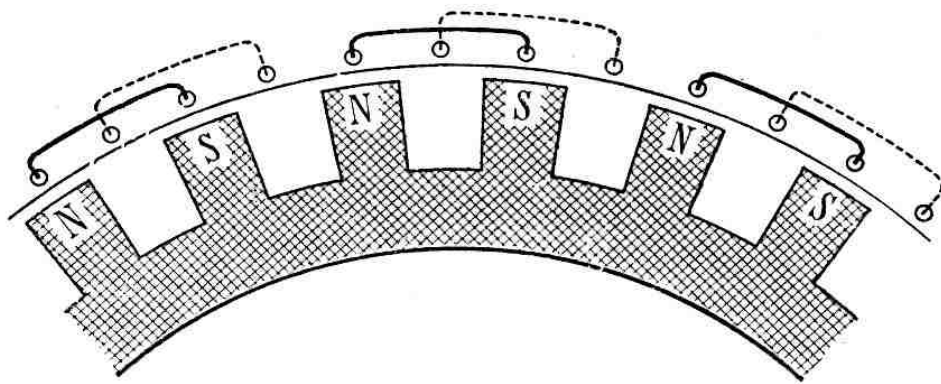


FIG. 53. — Schéma d'un alternateur diphasé.

Considérons en effet les pôles au moment où ils approchent des encoches du premier enroulement : il y a production d'un courant qui va en croissant, passe par un maximum, puis diminue; pour les deuxièmes séries d'encoches il en est de même, mais quand le courant est maximum dans le premier enroulement, il est nul dans le deuxième et inversement, parce que les pôles ne produisent leur effet d'induction que successivement à mesure qu'ils passent.

Nous pouvons ainsi obtenir des courants à nombre de phases quelconque. Il suffit d'introduire entre les encoches principales un nombre quelconque de nou-

velles encoches formant autant d'enroulements différents. Nous aurons dans chacun d'eux un courant alternatif, mais ces courants seront décalés, l'un par rapport à l'autre, d'un intervalle correspondant à celui qui sépare les encoches. C'est là tout le principe de la production des courants polyphasés, on voit qu'il est assez simple.

CHAPITRE II

Courants triphasés

Production des courants triphasés. — Il résulte de ce que nous venons de voir que si nous prenons un alternateur monophasé ordinaire du genre de ceux dont nous avons exposé le principe, et si, entre les encoches de l'enroulement induit de cet alternateur, nous pratiquons *deux* séries de nouvelles encoches en divisant en trois l'intervalle qui sépare les deux encoches consécutives du premier enroulement, nous pourrions réaliser deux nouveaux enroulements qui seront chacun le siège d'un courant alternatif. De même que dans l'alternateur diphasé, ces courants n'auront pas lieu en même temps; les pôles inducteurs ne passant que successivement devant les encoches, nous aurons trois courants alternatifs décalés d'un tiers de période : c'est ce que l'on appelle des *courants triphasés*.

Ces courants triphasés sont capables de produire des champs tournants comme les courants diphasés. Ainsi que nous le verrons plus loin, c'est là tout le secret de leur grande vogue.

Mais, dira-t-on tout de suite, pourquoi produire des courants triphasés, puisque les courants diphasés permettent d'arriver au même résultat? Ne va-t-on pas au-devant d'une certaine complication, les alter-

nateurs diphasés ayant l'air d'être plus simples que les alternateurs triphasés, puisqu'ils ne nécessitent qu'un jeu d'encoches supplémentaires au lieu de deux?

Il n'en est rien. Si l'alternateur triphasé paraît plus compliqué, en réalité il permet une meilleure utilisation du matériel. Nous verrons par la suite que dans l'emploi de ces courants, on peut réduire à trois le nombre des fils de ligne. Avec les courants diphasés il en faut 4. Nous avons montré cependant que l'on pouvait réunir deux des fils dans les distributions diphasés et n'en avoir finalement que 3, mais c'est une distribution dissymétrique, le fil commun devant avoir une plus forte section que les deux autres (nous avons vu que si les deux fils sont prévus pour transmettre un courant I_{eff} , le fil commun devra pouvoir supporter $I_{\text{eff}} \sqrt{2}$), c'est-à-dire avoir une section 1,4 fois plus grande. L'avantage de la simplicité reste donc aux transmissions à courants triphasés. On voit en passant l'infériorité du courant alternatif simple dit « monophasé ». Dans le même alternateur monophasé, en logeant une série d'encoches de plus, nous avons 2 courants alternatifs au lieu d'un seul, et avec deux séries d'encoches supplémentaires, nous avons 3 courants alternatifs, le fer et les inducteurs sont donc bien mieux utilisés. Voilà pourquoi on a intérêt à produire des courants polyphasés plutôt que des courants monophasés.

Champs tournants produits par les courants triphasés. — De même que les courants diphasés, les courants triphasés sont susceptibles de produire des champs tournants.

Considérons trois cadres 1, 2 et 3 (fig. 54), analogues aux deux cadres utilisés avec les courants diphasés (fig. 47). Plaçons au centre commun de ces trois

cadres une aiguille aimantée NS mobile sur son axe, et relient chacun des cadres aux trois circuits d'un alternateur triphasé défini comme nous venons de le voir.

Considérons l'instant où le courant alternatif qui parcourt le cadre n° 1 va devenir maximum, l'aiguille NS aura tendance à se mettre en croix avec ce cadre, elle va tourner dans le sens de la flèche, par exemple. Mais par suite de la disposition même des enroulements dans l'alternateur triphasé, le courant, après avoir été maximum dans le cadre

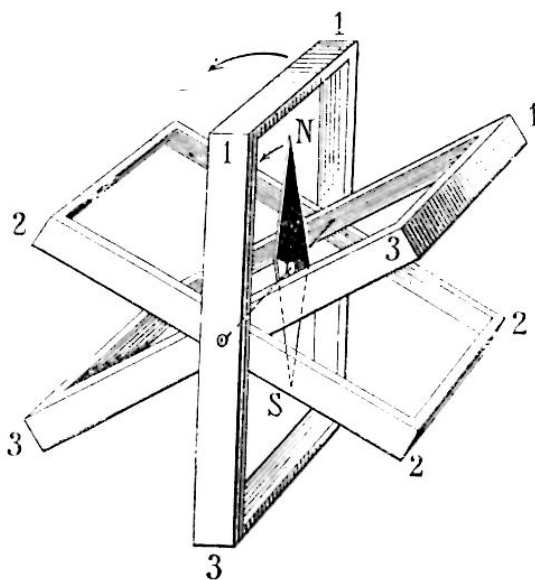


FIG. 54. — Effet des courants triphasés sur une aiguille aimantée.

n° 1 deviendra maximum dans le cadre n° 2, ce qui aura pour effet de chasser l'aiguille aimantée dans la même direction que précédemment, puis le courant deviendra maximum dans le cadre n° 3 et l'aiguille continuera à tourner. Pendant ce temps le courant se sera inversé dans le cadre n° 1, il circulera en sens inverse dans ce cadre au moment où l'aiguille le franchit, nouvel effet de ce cadre chassant l'aiguille dans le cadre suivant, dans lequel le courant s'inverse à son tour. L'aiguille est chassée vers le cadre n° 3

et ainsi de suite. Il en résulte une rotation continue de l'aiguille, à condition toutefois que les successions de courant coïncident avec les déplacements successifs de l'aiguille. Tout se passera comme si l'on faisait tourner au-dessus de l'aiguille un aimant qui l'entraînerait dans sa course, de là le nom de « champ tournant » au phénomène dû à la présence de trois cadres parcourus par des courants triphasés.

En pratique, ce n'est pas une aiguille aimantée qui est entraînée par le champ tournant dans les

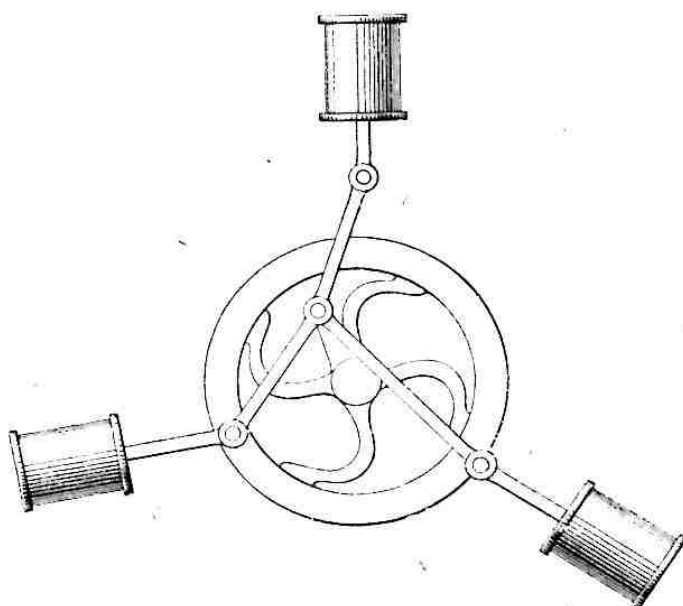


FIG. 55. — Mécanisme de l'action des courants triphasés.

moteurs triphasés, mais une sorte d'électro-aimant. La partie tournante ou *rotor* de ces moteurs comporte un noyau de fer sur lequel se trouve enroulé du fil. Par induction, des courants prennent naissance dans ce fil comme dans le secondaire d'un transformateur; ces courants aimantent le fer, lequel se trouve entraîné dans le champ à la façon de l'aiguille aimantée.

On ne peut mieux faire qu'assimiler un système triphasé à l'action des trois pistons de trois machines

à vapeur sur une manivelle unique (fig. 55). Des machines de ce genre ont été employées autrefois (machines Brotherhood) pour obtenir un départ dans toutes les positions de la manivelle et une vitesse de rotation plus constante que dans les machines à un seul cylindre. On comprend, en effet, qu'avec un tel montage il ne puisse jamais y avoir de point mort, car il y a toujours deux pistons au moins en bonne position quand l'autre est au point mort. C'est exactement ce qui se passe dans un système triphasé.

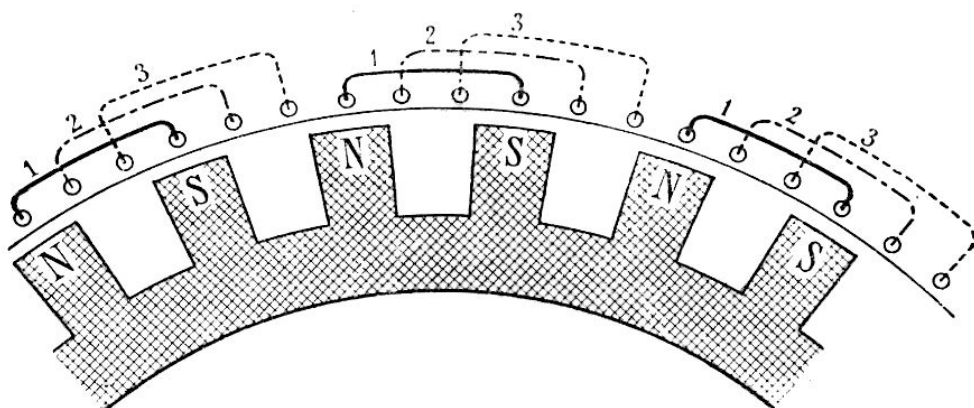


FIG. 56. — Schéma d'un alternateur triphasé.

Dans les moteurs triphasés le système de cadres forme un bobinage fixe; il est appelé *stator*, parce qu'il ne bouge pas. Au contraire, le champ tournant qui en résulte entraîne la partie mobile appelée *rotor* ainsi que nous l'avons indiqué plus haut.

Le bobinage d'un alternateur triphasé ou le stator d'un moteur triphasé qui lui est identique se résume à celui de la figure 56; on voit nettement en traits pleins les bobines qui correspondent à l'enroulement monophasé pris comme point de départ, et, entre les encoches extrêmes de cet enroulement, deux autres encoches, l'une recevant un enroulement marqué en traits espacés —. —. —, l'autre un enroulement indiqué en traits pointillés

On comprend très bien qu'un pôle N induise

successivement des courants dans ces trois circuits, courants qui se succéderont de telle façon, qu'après avoir été maximum dans le circuit — il devient maximum dans le circuit —.—.— puis dans le circuit redevient maximum, mais en sens inverse,

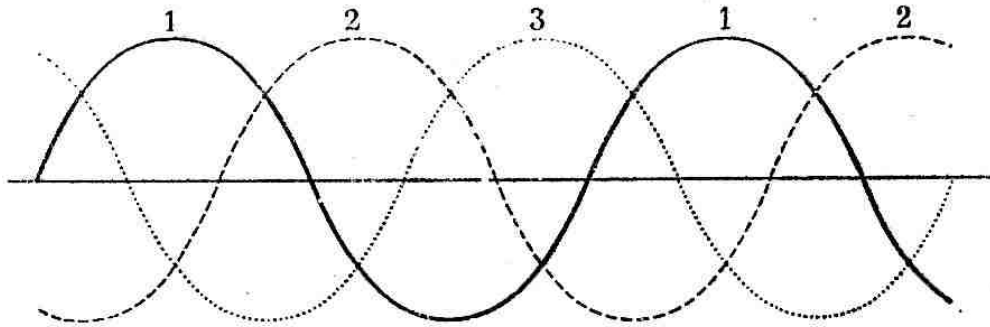


FIG. 57. — Courbes des courants triphasés.

dans le circuit —.—.— puis dans le circuit —.—.— et enfin dans le circuit et ainsi de suite. La figure 53 montre sous forme de courbes la succession des trois courants (fig. 57).

Pratiquement, les alternateurs et les moteurs triphasés qui, en somme, comportent des bobinages

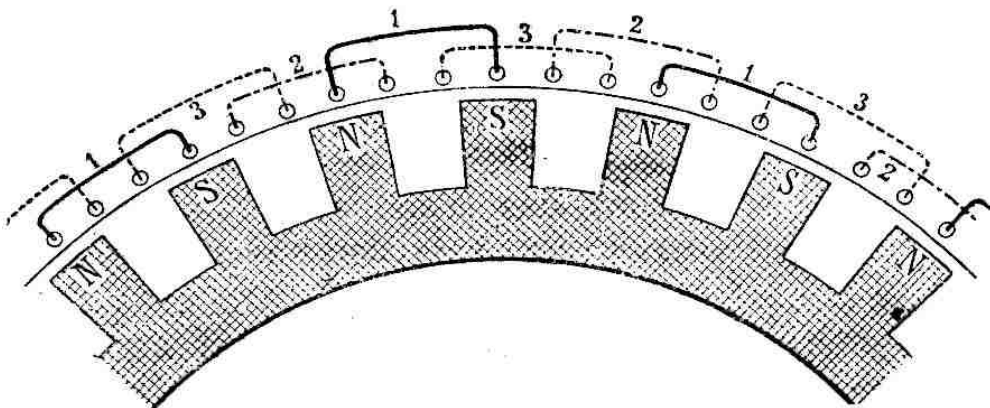


FIG. 58. — Schéma simplifié de l'alternateur triphasé.

identiques, ont des enroulements formés de bobines successives, mais qui chevauchent le moins possible afin d'éviter les contacts entre fils appartenant à des phases différentes, fils entre lesquels il peut y avoir

à un moment donné des tensions élevées. On préfère leur donner la disposition de la figure 58 qui fait ressembler l'enroulement à un bobinage diphasé, mais qui n'en est pas moins triphasé. Il suffit en effet de compter les groupes d'encoches entre deux pôles consécutifs pour se rendre compte s'il s'agit de l'un ou de l'autre des bobinages di ou triphasés.

Notons également qu'en pratique les fils d'une même bobine ne sont pas tous dans la même encoche, mais sont répartis dans des encoches voisines; cela évite d'avoir des encoches trop profondes et cela rend le bobinage plus facile.

Propriétés des courants triphasés. — Une propriété assez curieuse des courants triphasés est qu'à chaque instant la somme des intensités est nulle.

On peut le démontrer d'une foule de manières; la plus simple, celle qui saute aux yeux, résulte de l'examen des courbes de la figure 57. Si, avec une bande de papier ou un compas, on additionne les valeurs des courants positifs, en notant leur intersection avec une même ligne verticale, on voit que cette somme est constamment égale à celle des courants négatifs pris sur la même ligne pour n'importe quelle ligne verticale prise sur les courbes, c'est-à-dire à un instant quelconque. Cela se voit sans instrument aux moments où l'un des trois courants passe par zéro; les deux autres ont alors des valeurs égales et de signe contraire.

Le système des vecteurs nous fournit aussi une démonstration de cette propriété. Les courants triphasés sont constitués par trois courants alternatifs identiques comme forme et comme amplitude, mais décalés d'un tiers de période, c'est-à-dire de 120° (1). Traçons une circonférence (fig. 59) que

(1) Une période correspond à un tour, soit à 360° , le tiers de période sera donc représenté par 120° .

nous diviserons en trois et joignons le centre à ces trois points; nous avons 3 vecteurs qui nous représentent les 3 courants alternatifs. Nous les désignerons par 1, 2 et 3.

Nous allons montrer que la somme géométrique de deux vecteurs quelconques est égale au troisième vecteur. Prenons les vecteurs 2 et 3 et joignons l'extrémité B du vecteur 2 au point D, milieu de

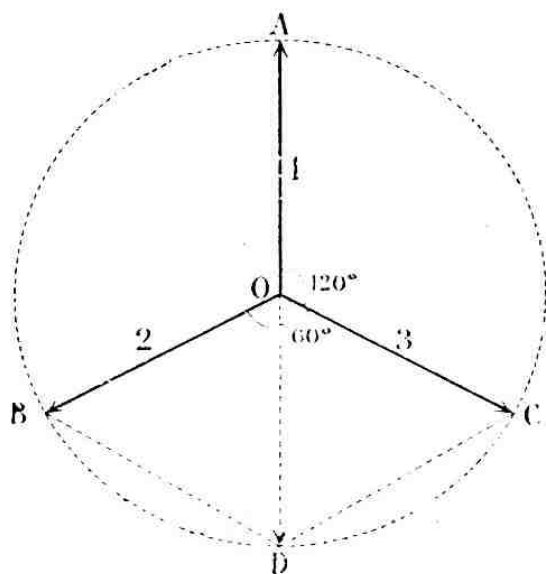


FIG. 59. — Représentation par vecteurs des courants triphasés.

l'arc BC, de même joignons CD. La droite OD est la bissectrice de l'angle BOC puisque le point D a été pris au milieu de l'arc BC; comme l'angle BOC vaut 120° , les angles DOC et BOD en valent la moitié, soit 60° . On en déduit que OD est dans le prolongement de OA, puisque la somme des deux angles AOC et COD représente 180° . De plus $OD = OA$, puisque ce sont deux rayons, mais OD est la résultante de OB et de OC, d'après le parallélogramme des forces OBDC (les triangles ODC et OBD étant équilatéraux, côtés égaux au rayon). Donc à chaque instant la somme géométrique des vecteurs et, par suite,

des courants qu'ils représentent, est nulle (1).

Avec des démonstrations analogues, on arriverait à montrer que la somme des différences de potentiel est nulle à un moment quelconque.

(1) Il y a un autre moyen de montrer mathématiquement que la somme de trois courants décalés de 120° est nulle.

Les valeurs successives que prend un courant alternatif peuvent être représentées par une sinusoïde (p. 80) et deux fois par période cette valeur passe par un maximum $I_{\max}$. A un moment quelconque le courant alternatif aura pour valeur $I_{\max}$ réduit dans la proportion du sinus de l'angle correspondant.

Pour nous placer dans un cas général, ne considérons pas le courant à son départ ou à son maximum, mais prenons le cadre ou la machine qui produit le courant au moment où il a tourné d'un angle α par rapport à la position de départ; ce courant est à cet instant représenté par la formule :

$$i_1 = I_{\max} \sin \alpha.$$

Mais à cet instant le deuxième courant i_2 décalé de 120° , soit de $\frac{2\pi}{3}$ par rapport au premier, a pour valeur :

$$i_2 = I_{\max} \sin \left(\alpha - \frac{2\pi}{3} \right).$$

Enfin le troisième courant décalé de 240° , soit $\frac{4\pi}{3}$ par rapport au premier, a pour valeur :

$$i_3 = I_{\max} \sin \left(\alpha - \frac{4\pi}{3} \right).$$

Faisons la somme de ces trois courants, nous avons :

$$i_1 + i_2 + i_3 = I_{\max} \left[\sin \alpha + \sin \left(\alpha - \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left(\alpha - \frac{4\pi}{3} \right) \right].$$

Pour ajouter deux sinus, nous appliquerons la formule :

$$\sin p + \sin q = 2 \sin \left(\frac{p+q}{2} \right) \cos \left(\frac{p-q}{2} \right).$$

Montages utilisés avec les courants triphasés.

— Nous avons vu, page 150, que les alternateurs industriels produisant des courants triphasés étaient constitués par trois enroulements identiques entre eux, simplement décalés d'un tiers de l'intervalle

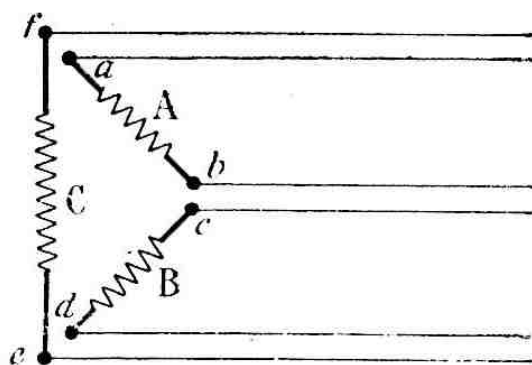


FIG. 60. — Montage triphasé en triangle à six fils.

séparant deux pôles. Les trois enroulements ont chacun deux extrémités ou deux bornes, soit six au total; ils nécessiteraient six fils de ligne, ce qui serait beaucoup. En réalité, on peut réduire ces six fils à trois, comme on va le voir.

La figure 60 représente les trois enroulements.

Prenons les deux derniers termes :

$$\begin{aligned} \sin\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) + \sin\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) &= 2 \sin\left(\frac{2\alpha - \frac{6\pi}{3}}{2}\right) \cos \frac{2\pi}{6} \\ &= 2 \sin\left(\alpha - \pi\right) \cos \frac{\pi}{3} \\ &= \sin(\alpha - \pi) \end{aligned}$$

Mais $\cos \frac{\pi}{3} = \cos 60^\circ = \frac{1}{2}$, il en résulte que l'expression se réduit à $\sin(\alpha - \pi)$, mais $\sin(\alpha - \pi)$ est égal à $-\sin \alpha$.

L'expression entre crochets devient donc nulle et $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ ainsi qu'il fallait le démontrer.

A, B, C et leurs 6 bornes $a, b, -c, d, -e, f$, d'où partent six fils.

Comme nous l'avons fait avec les courants diphasés (avec lesquels nous avons réduit de 4 à 3 le nombre des fils, nous pourrions relier deux à deux les bornes; nous obtiendrions le montage de la figure 61 qui est dit montage *en triangle*. La section des fils communs devra être prévue pour supporter, comme nous allons le voir, la résultante des deux courants provenant des deux branches du triangle qui aboutissent à ce fil commun.

On peut aussi grouper les trois enroulements A, B, C, suivant la disposition de la figure 62. On a

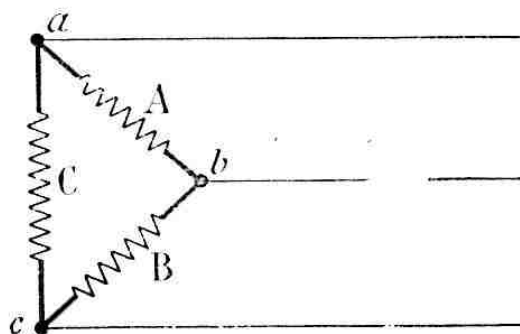


FIG. 61, — Montage en triangle, réduction à trois du nombre des fils.

alors un montage dit *en étoile* avec 6 fils. Hâtons-nous de dire que ces six fils vont pouvoir être réduits ici encore à trois, simplement en supprimant les trois fils centraux partant des bornes a, b, c ; nous aurons alors le montage de la figure 63 que l'on rencontre souvent.

Mais alors, dira-t-on, comment se fait le retour des courants que ramenaient les fils partant des bornes a, b, c ? Il n'a pas besoin de se faire ou plutôt il se fait tout seul en vertu du principe énoncé et démontré ci-dessus, savoir, que *dans un système triphasé équilibré, la somme des intensités est nulle à*

chaque instant. — Cela veut dire que la somme des courants $i_1 + i_2 + i_3$, aboutissant aux points a, b, c , est nulle à chaque instant; aucun fil de retour n'est donc plus nécessaire et le point o , centre de l'étoile, est appelé *point neutre* de la distribution.

On exprime ce fait d'une façon plus imagée en

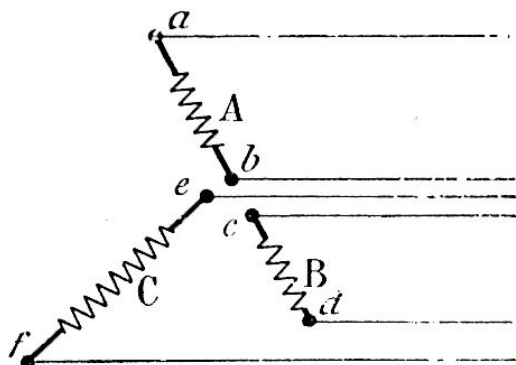


FIG. 62. — Montage triphasé en étoile à six fils.

disant que *dans un système triphasé équilibré, chaque fil sert de retour aux deux autres.*

Nous avons bien spécifié qu'il s'agissait d'un système triphasé équilibré, c'est-à-dire dont les

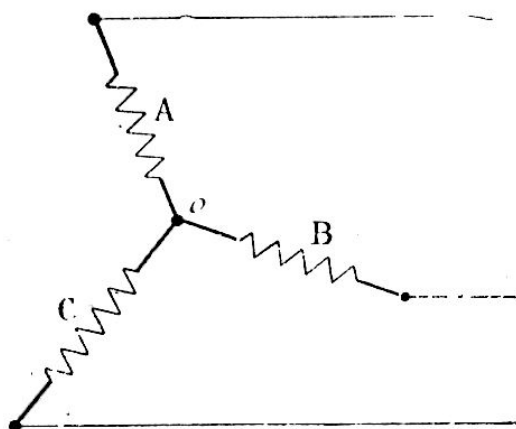


FIG. 63. — Montage triphasé en étoile, réduction à trois du nombre des fils.

trois circuits sont parcourus par des courants de même forme et de même amplitude $I_{\max}$ et décalés exactement de 120° . En pratique, si la distribution

alimente par exemple des lampes et s'il y a plus de lampes sur une des branches ou « phase » du système triphasé, la somme des courants ne sera pas nulle et on devra prévoir un fil reliant les centres o des étoiles. Ce fil est dit *fil neutre*, et c'est en général entre ce fil et l'un quelconque des trois fils de phase

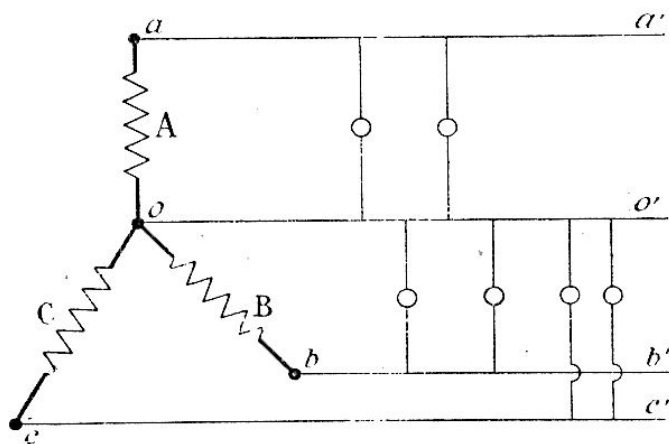


FIG. 64. — Montage triphasé avec fils neutres pour circuits non équilibrés.

que l'on branche les lampes; les moteurs, au contraire, reçoivent les trois fils de phase sans neutre et sont montés, comme nous allons le voir, en *étoile* ou en *triangle*, suivant les cas.

Propriétés des différents montages. — 1° *Montage en triangle.* — Considérons le montage en triangle de la figure 60. Nous avons dit que l'on pouvait réduire à trois le nombre de fils d'alimentation, à condition de prévoir pour chacun des trois fils restants une section capable de supporter la résultante des courants provenant des deux branches du triangle qu'il dessert.

Quelle est la valeur de cette résultante? C'est ce que nous allons examiner.

Considérons (fig. 65) les trois vecteurs OA , OB , OC , qui représentent les trois courants alternatifs décalés de 120° d'un système triphasé.

Cherchons à évaluer la somme géométrique des courants qui aboutissent au sommet b du triangle (fig. 66). En courant continu ce serait, d'après les flèches, $i_1 - i_2$; en alternatif c'est la somme géométrique ou la résultante de ces deux courants.

Pour obtenir cette résultante, portons dans le prolongement de OB , mais de l'autre côté du point O ,

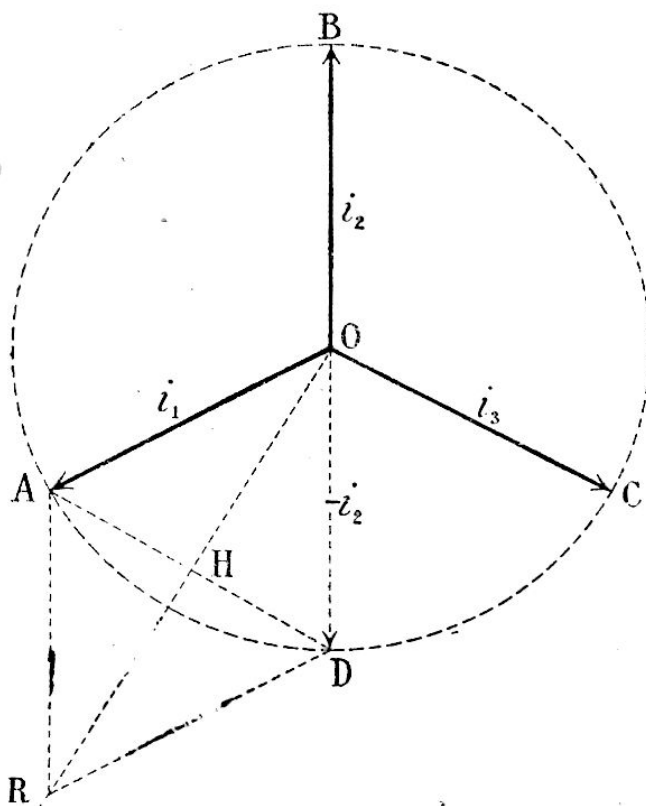


FIG. 65. — Calcul de la valeur des courants résultants.

la longueur $OD = OB$, le point D est sur la circonférence puisque OB est un rayon. La longueur OD représentera $-i_2$ si OB représente i_2 . Nous aurons donc à composer $OA = i_1$ avec $OD = -i_2$ pour avoir la résultante cherchée. Formons le parallélogramme et soit OR cette résultante, cherchons à l'évaluer et pour cela joignons AD . Le triangle AOD est équilatéral, les deux côtés OA et OD sont égaux comme rayons égaux eux aussi à AD qui représente

le côté de l'hexagone inscrit, lequel, on le sait, est égal au rayon. D'autre part, la résultante OR émanant de deux composantes égales, OA et OD, est bissectrice de l'angle qu'elles forment, et, par suite, est perpendiculaire à AD. Il y a encore une autre manière de le démontrer, c'est en faisant remarquer que le parallélogramme OARD est un losange dont les diagonales OR et AD sont perpendiculaires.

Il en résulte que dans le triangle rectangle OAH, nous avons :

$$\overline{OA}^2 = \overline{OH}^2 + \overline{AH}^2$$

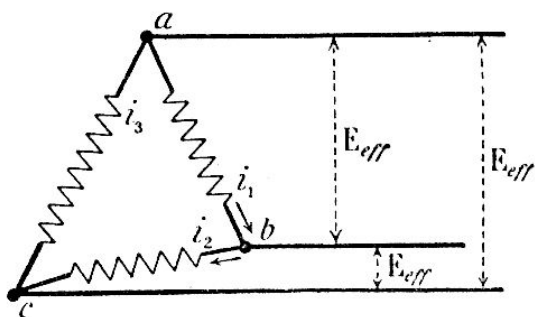


FIG. 66. — Montage en triangle.

mais OA c'est i_1 et AH est la moitié de AD, lequel est égal à OA soit à i_1 ; nous aurons donc :

$$i_1^2 = \overline{OH}^2 + \left(\frac{i_1}{2}\right)^2, \text{ d'où on tire } \overline{OH}^2 = i_1^2 - \frac{i_1^2}{4}$$

et :

$$\overline{OH}^2 = \frac{4i_1^2 - i_1^2}{4} = \frac{3i_1^2}{4}, \text{ d'où } \overline{OH}^2 = \frac{i_1^2 \sqrt{3}}{2}.$$

(OH est la hauteur du triangle équilatéral; nous aurons pu éviter le calcul ci-dessus, en indiquant la valeur de cette hauteur en fonction des côtés qui est connue.)

Mais OH ne correspond qu'à la moitié de la résul-

tante, donc OR représente le double de cette valeur, c'est-à-dire : $OR = i_1 \sqrt{3}$.

On en déduit que le courant résultant dans le fil aboutissant au sommet b du triangle abc , figure 66, est égal à $i_1 \sqrt{3}$.

Il en est de même pour chaque sommet, par raison de symétrie, puisque les trois courants sont identiques.

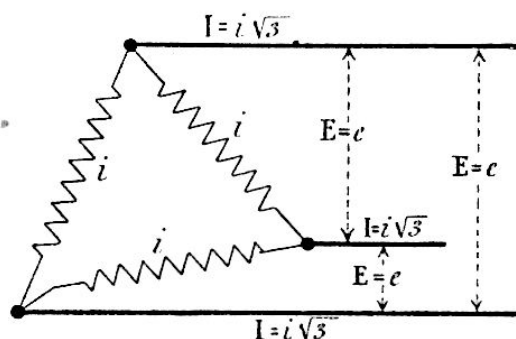


FIG. 67. — Valeur des divers éléments dans un montage en triangle.

Il en résulte que la section des fils aboutissant aux points abc doit donc être prévue (fig. 62) non pas pour supporter deux fois le courant d'une phase comme il semblerait à première vue, mais pour la valeur de ce courant multipliée par $\sqrt{3}$, c'est-à-dire par 1,732. Et pour les tensions que se passe-t-il? Oh! quelque chose de bien simple : la tension aux extrémités a et b est E_{eff} égale à celle e_{eff} qui existe entre les deux fils, de même entre b et c ainsi qu'entre c et d .

Nous nous souviendrons, et ce sera très utile plus tard, que dans le montage en triangle équilibré (fig. 67) :

1° La tension entre fils de ligne est la même que celle qui existe entre les bornes des enroulements formant le triangle;

2° L'intensité dans chaque fil de ligne est égale à

l'intensité du courant dans un quelconque des enroulements de phase multipliée par 1,732.

2° *Montage en étoile.* — Si nous prenons un montage en étoile (fig. 68), il est facile de voir que le courant dans les fils de l'enroulement est le même que celui du fil de ligne auquel l'enroulement est relié, seule la différence de potentiel n'est pas la même.

Un raisonnement identique au précédent, basé sur ce que la différence de potentiel entre A et B est la résultante des tensions entre OA et OB, condui-

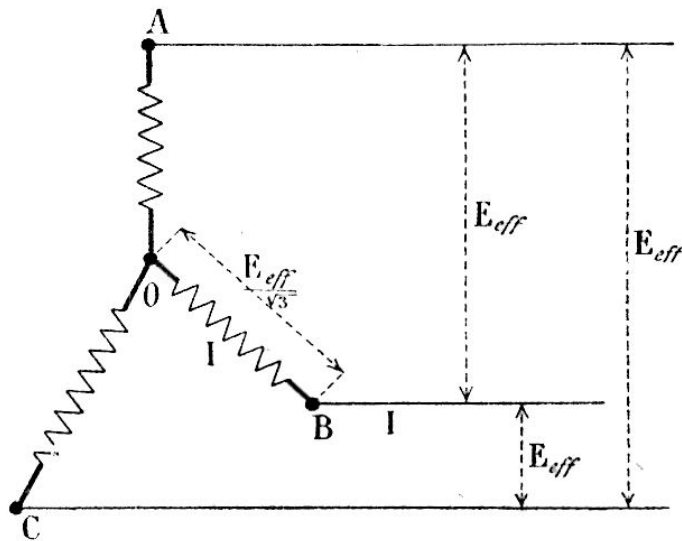


FIG. 68. — Montage étoile.

rait à écrire que cette tension résultante est égale à la tension d'une phase multipliée par $\sqrt{3}$.

On en déduit que si E_{eff} est la tension entre fils de ligne, la tension entre chaque fil de ligne et le point neutre : e_{eff} sera égal à $\frac{E_{\text{eff}}}{\sqrt{3}}$.

Il importe de bien retenir ces propriétés du triangle et de l'étoile que résument plus clairement les figures ci-dessus auxquelles il suffira d'avoir recours dans chaque cas embarrassant.

Applications pratiques. — Les montages ci-dessus se prêtent à des applications pratiques intéressantes; prenons le cas, par exemple, d'une station génératrice alimentant par une ligne triphasée une ville éloignée, quels montages allons-nous adopter?

Supposons que, par suite de considérations diverses, nous ayons choisi pour la station génératrice des alternateurs triphasés donnant 5 000 volts efficaces aux bornes de chaque enroulement. Nous devons prévoir à l'arrivée dans la ville des transformateurs

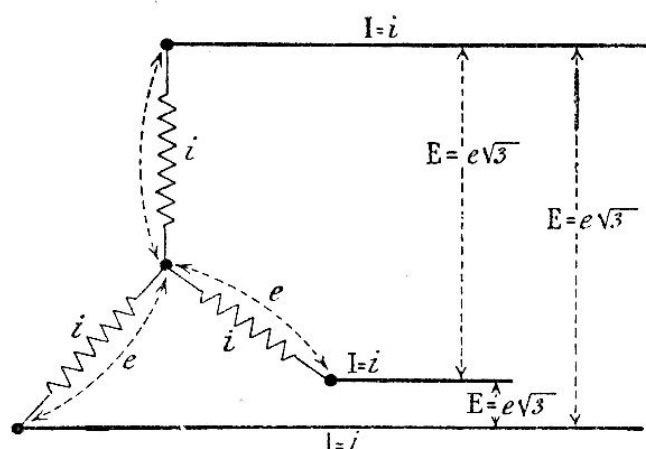


FIG. 69. — Montage étoile. Valeur des divers éléments.

triphasés dont les primaires devront être calculés pour fonctionner avec 5 000 volts entre fils du même enroulement. Comment allons-nous coupler nos circuits?

Dès le début de l'installation, tandis que la ville ne comportera que peu de clients à desservir, nous monterons nos alternateurs en triangle, ainsi que nos transformateurs à l'arrivée. De cette façon, la tension entre chacun des trois fils de ligne sera celle correspondant à chacun des enroulements, soit 5.000 volts.

A mesure que le nombre des clients desservis augmentera, le courant demandé à l'usine et trans-

mis par la ligne s'accroîtra lui aussi; mais pour un même courant I_{eff} , nous avons la faculté d'augmenter la puissance transmise sans renforcer notre ligne, rien qu'en passant du montage en triangle au montage en étoile. A ce moment, la tension entre fils de ligne deviendra $5\,000 \times \sqrt{3} = 8\,660$ volts, et pour une même intensité I_{eff} nous aurons accru la puissance transmise sans rien changer à notre ligne. Seuls les enroulements des alternateurs ou des transformateurs travailleront à une intensité plus élevée, mais il suffira de les prévoir pour cela où d'en monter de nouveaux en parallèle.

CHAPITRE III

Évaluation de la puissance dans les circuits triphasés

Puissance des courants triphasés. — Ce qui précède nous amène à examiner la question de la puissance en courants triphasés, elle va se résoudre d'une façon simple.

Considérons les trois circuits de la figure 64; nous pouvons dire que chacun d'eux réalise une distribution monophasée. Or, nous savons que si e_{eff} est la tension efficace aux bornes de ce circuit, i_{eff} l'intensité du courant qui le parcourt, et φ l'angle de décalage de l'intensité sur la force électromotrice, la puissance mise en jeu a pour expression :

$$P = e_{\text{eff}} \times i_{\text{eff}} \times \cos \varphi.$$

Comme il y a trois circuits, la puissance totale est :

$$P_{\text{totale}} = 3 e_{\text{eff}} i_{\text{eff}} \cos \varphi.$$

Mais nous pouvons coupler ces circuits de deux façons différentes, en triangle ou en étoile.

1° *Triangle.* — La tension entre deux des fils de ligne e_{eff} est égale à celle qui existe entre les deux extrémités de l'un des enroulements, soit E_{eff} , mais

l'intensité dans les fils de chaque enroulement constituant l'un des côtés du triangle est égale à l'intensité de ligne divisée par $\sqrt{3}$, c'est-à-dire que dans la formule précédente $i_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{eff}}}{\sqrt{3}}$. Remplaçons, d'autre part, e_{eff} par E_{eff} , nous aurons :

$$P_{\text{totale}} = 3 \times E_{\text{eff}} \times \frac{I_{\text{eff}}}{\sqrt{3}} \cos \varphi$$

Mais $3 = \sqrt{3} \times \sqrt{3}$; remplaçons, nous aurons :

$$P_{\text{triangle}} = \sqrt{3} \times E_{\text{eff}} \times I_{\text{eff}} \cos \varphi.$$

2° *Etoile*. — Dans le montage en étoile l'intensité efficace I_{eff} dans un des fils de ligne est la même que celle qui circule dans chaque enroulement i_{eff} mais à l'inverse du triangle, la tension entre les extrémités de chaque enroulement ou, si l'on veut, entre chaque fil de ligne et le point neutre, est égale à la tension entre fils de ligne E_{eff} divisée par $\sqrt{3}$. Dans la formule :

$$P_{\text{totale}} = 3 e_{\text{eff}} i_{\text{eff}} \cos \varphi$$

remplaçons e_{eff} par $\frac{E_{\text{eff}}}{\sqrt{3}}$ et i_{eff} par I_{eff} qui lui est égal et nous aurons :

$$P_{\text{étoile}} = 3 \times \frac{E_{\text{eff}}}{\sqrt{3}} \times I_{\text{eff}} \times \cos \varphi.$$

De même que précédemment 3 peut s'écrire $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$, d'où, en simplifiant :

$$P_{\text{étoile}} = \sqrt{3} \times E_{\text{eff}} \times I_{\text{eff}} \times \cos \varphi.$$

formule analogue à la précédente.

Nous en déduirons que si nous considérons uniquement le courant I_{eff} qui circule dans chacun des trois fils de ligne d'un système triphasé équilibré et la ten-

sion E_{eff} existant entre chacun de ces trois fils, l'expression de la puissance s'écrit :

$$P_{\text{tripha}} = E_{\text{eff}} \times I_{\text{eff}} \times \cos \varphi \times \sqrt{3}$$

Pour évaluer cette puissance, nous utiliserons un seul wattmètre; si le circuit est équilibré, il nous suffira en effet de le brancher pour mesurer la puissance dépensée dans une phase considérée comme si elle était seule et l'on n'aura qu'à multiplier par trois le résultat obtenu, mais ce cas ne se présente que très rarement pour ne pas dire jamais.

Si les circuits ne sont pas équilibrés, ce qui arrive

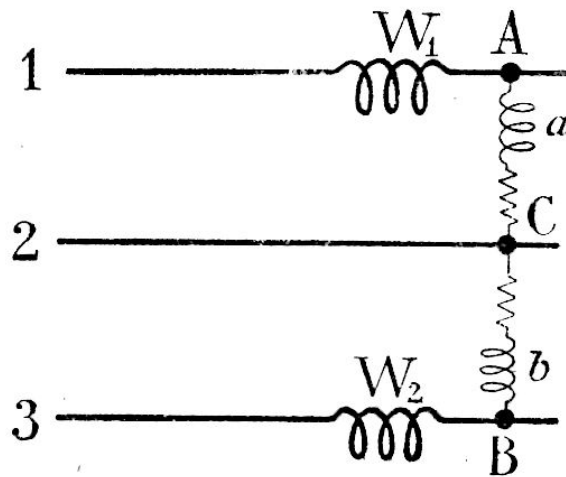


FIG. 70. — Montage de deux wattmètres sur un réseau triphasé.

souvent, on devra employer trois wattmètres ou deux à la rigueur en employant le montage de la figure 70. Le gros fil W_1 de l'un des wattmètres sera intercalé dans le trajet de l'un des fils de ligne et son fil fin a relié d'une part à ce fil et au fil 2. Le deuxième wattmètre W_2 aura son gros fil intercalé dans le trajet du fil de ligne 3 et son fil fin b , relié d'une part à ce fil 3 et d'autre part au fil 2, comme le fil fin du premier wattmètre.

La somme des puissances indiquées par les deux appareils sera la puissance totale, quel que soit le déséquilibre.

CHAPITRE IV

Calcul des lignes à courants triphasés

Les courants triphasés n'étant autres que des courants alternatifs décalés, l'un par rapport à l'autre, d'un tiers de période, le calcul des lignes parcourues par les courants est identique à celui que nous avons déjà vu à propos du courant alternatif simple.

Nous prendrons deux exemples : le premier concernera une installation à basse tension, intéressant des lignes courtes, comme c'est le cas des ateliers en général; le deuxième exemple sera celui d'une transmission d'énergie par courants triphasés à haute tension (25 000 volts) et à une distance importante (60 km.).

Dans les deux cas, nous appliquerons la méthode de Boucherot de la conservation des puissances réelle et magnétisante, méthode qui permet d'arriver facilement et sans calculs compliqués au résultat.

PREMIER EXEMPLE. — Soient (fig. 7) deux ateliers A_1 et A_2 , desservis l'un A_1 par un moteur M_1 triphasé de 20 chevaux, rendement 0,8, $\cos \varphi = 0,7$ (indications figurant sur la plaque du constructeur), et l'autre A_2 contenant un moteur M_2 également triphasé de 40 chevaux, rendement 0,9, $\cos \varphi = 0,8$. Les distances à la

ligne principale T sont données par le schéma. Au point T se trouve le transformateur ou l'alternateur qui maintient une tension efficace de 120 volts entre

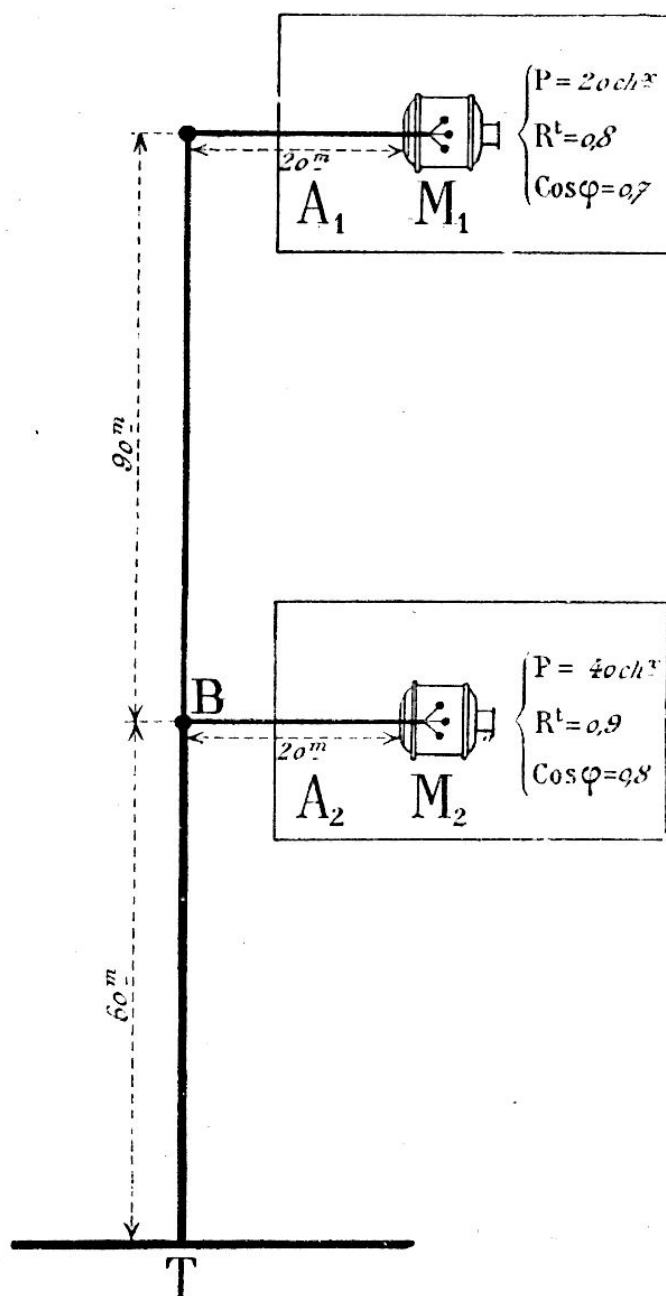


FIG. 71. — Calcul de lignes desservant des moteurs triphasés.

On demande de calculer les fils de manière que la perte de puissance en charge normale soit de 5 p. 100 seulement de la puissance reçue.

Formons le petit tableau habituel des puissances réelles P_r , magnétisantes P_m et apparentes P_a et pour cela prenons chaque moteur séparément.

Pour calculer la puissance réelle à fournir au moteur M_1 nous ne perdrons pas de vue que la puissance de 20 chevaux est celle réellement disponible sur l'arbre; aux bornes du moteur elle doit être, à cause de la perte due au rendement de $\frac{20}{0,8} = 25$ chevaux, soit en watts $25 \times 736 = 18\,400$ watts.

La puissance apparente que nous avons besoin de connaître est telle que, multipliée par le facteur de puissance $\cos \varphi = 0,7$, elle donne 18 400; elle est donc égale à $\frac{18\,400}{0,7} = 26\,300$ volts-ampères.

La puissance magnétisante s'en déduit (voir p. 120) ainsi que nous l'avons vu, elle est égale à :

$$\sqrt{26\,300^2 - 18\,400^2} = 18\,410$$

Or, d'après l'énoncé du problème, nous ne devons perdre dans la ligne que 5 p. 100 de la puissance reçue, soit, en ce qui concerne le moteur M_1 , 5 p. 100 de la puissance réelle de 18 400 watts (1); nous ne devons donc dépenser dans la ligne que $0,05 \times 18\,400 = 920$ watts. Mais sur ces 920 watts, la ligne comprise entre M_1 et B, d'une longueur de $90 + 20 = 110$ mètres n'en représente que les $\frac{11}{17}$;

elle devra donc être prévue pour n'absorber que $\frac{11 \times 920}{17} = 590$ watts.

Passons au moteur M_2 .

(1) Les puissances perdues dans les lignes et appareils correspondent toujours à des puissances réelles, qui seules exigent de l'énergie se transformant ensuite en chaleur.

La puissance électrique réelle à fournir aux bornes sera, pour les mêmes raisons que pour le moteur M_1

$$P_r = \frac{40 \times 736}{0,9} = 32\,700 \text{ watts.}$$

La puissance apparente, pour un facteur de puissance $\cos \varphi = 0,9$, sera $\frac{32\,700}{0,9} = 36\,300 \text{ V-A}$, et la puissance magnétisante :

$$P_m = \sqrt{36\,300^2 - 32\,700^2} = 15\,930$$

ou si l'on préfère :

$$P_m = P_a \times \sin \varphi.$$

Cherchant dans la table l'angle qui a pour cosinus 0,9, nous trouvons 26° dont le sinus est de 0,439. Nous avons donc :

$$P_a \times \sin \varphi = 36\,300 \times 0,439 = 15\,930$$

valeur qui est la même que celle précédemment trouvée.

La puissance à perdre dans le tronçon de ligne M_2B qui a 20 mètres et représente les $\frac{2}{8}$ de la longueur totale séparant M_2 de T sera comme précédemment de :

$$0,05 \times 32\,700 \times \frac{2}{8} = 408 \text{ watts.}$$

Reste à calculer la perte dans le tronçon de ligne B T commun aux deux moteurs; nous devons y faire entrer la perte due au premier moteur, soit :

$$0,05 \times 18\,400 \times \frac{6}{17} = 320 \text{ watts.}$$

et celle due au deuxième moteur, soit :

$$0,05 \times 32\,700 \times \frac{6}{8} = 1.226 \text{ watts.}$$

Nous avons maintenant tous les éléments nécessaires pour former le tableau :

PARTIES de l'installation	PUISSANCE réelle en watts	PUISSANCE magnétisante	PUISSANCE apparente en volts-ampères
Moteur M_1	18 400	18 410	26 300
Ligne M_1 B	590	—	—
Moteur M_2	32 700	15 930	36 300
Ligne M_2 B	408	—	—
Ligne B T	320	—	—
	1 226	—	—
Total	53 644	34 340	

La puissance apparente totale au point T est non pas la somme arithmétique des puissances apparentes portées sur le tableau comme l'on serait tenté de le croire, mais, ainsi que nous l'avons vu, la valeur :

$$\sqrt{53\,644^2 + 34\,340^2} = 63\,600 \text{ volts-ampères.}$$

Comme, d'après l'énoncé, la tension entre fils du réseau triphasé est de 120 volts, l'intensité du courant en ampères dans chacun des 3 fils sera de :

$$I = \frac{63\,600}{120 \times \sqrt{3}} = 305 \text{ ampères (1).}$$

Pour calculer la section des câbles à employer, on se basera sur ce qu'un conducteur en cuivre dans lequel la densité de courant est de 1 ampère par millimètre carré, donne lieu à une perte de 1,7 volt par 100 mètres. Si le courant est de 305 ampères et la longueur celle de BT, c'est-à-dire les 0,60 de 100 mètres, nous aurons comme perte totale dans les 3 fils :

$$1,7 \times 305 \times 0,6 \times 3 = 933 \text{ watts.}$$

(1) On a vu en effet que la puissance réelle en courants triphasés est $EI\sqrt{3} \times \cos \varphi$; la puissance apparente est donc

$$P_a = EI\sqrt{3}, \text{ d'où on tire } I = \frac{P_a}{E\sqrt{3}}$$

Mais, d'après notre calcul, c'est 1.546 watts que nous avons le droit de perdre dans ce tronçon; cela veut dire que le fil travaillera, non pas à 1 ampère par millimètre carré, mais à $\frac{1\,546}{933} = 1,6$ ampère par millimètre carré. La section des câbles entre B et T sera donc de $\frac{305}{1,6} = 190$ millimètres carrés. La chute de tension par câble sera :

$$1,7 \times 1,6 \times \frac{60}{100} = 1,63 \text{ volt.}$$

Calcul du tronçon M₁B. — L'intensité dans ce tronçon est dans chacun des 3 fils :

$$\frac{\sqrt{18\,400 + 590^2 + 18\,410^2}}{(120 - 1,63) \sqrt{3}} = 132 \text{ ampères.}$$

En effet, la puissance apparente est obtenue en tenant compte comme précédemment de la puissance réelle prise par le moteur : 18 400 watts plus la puissance dépensée dans le tronçon de ligne M₁B, soit 590 watts, et de la puissance magnétisante trouvée de 18 410.

En outre, on remarquera que la tension au point B n'est pas de 120 volts, mais $120 - 1,63 = 118,37$ volts.

Si le câble travaillait à 1 ampère par millimètre carré, on perdrait, avec 132 ampères sur la longueur de 110 mètres : $1,7 \times 132 \times \frac{110}{100} \times 3 = 740$ watts.

Or, nous ne devons perdre que 590 watts, il faudra donc adopter une densité de courant de $\frac{590}{740} = 0,79$ ampère par millimètre carré.

La section correspondante du fil sera de :

$$\frac{132}{0,79} = 166 \text{ millimètres carrés.}$$

La tension au moteur M_1 sera de :

$$\frac{26\,300}{132 \times \sqrt{3}} = 117 \text{ volts.}$$

Facteur de puissance général. — A pleine charge le facteur de puissance au point T sera :

$$\cos \varphi_g = \frac{P_r}{P_a} = \frac{53\,644}{63\,600} = 0,85.$$

Nous n'avons pas calculé le tronçon M_2B , mais ce calcul se ferait facilement en suivant la marche ci-dessus.

En somme, ces calculs ne sont pas difficiles, ils sont uniquement minutieux, mais avec un peu d'attention on pourra calculer une installation quelconque, en prenant soin chaque fois de faire très exactement le tableau des puissances réelles, magnétisantes et apparentes dont tout se déduira ensuite.

DEUXIÈME EXEMPLE. — *Une usine génératrice de courants alternatifs triphasés transmet de l'énergie par une ligne à 3 fils à une station réceptrice distante de 60 kilomètres. Cette station réceptrice alimente des moteurs représentant une puissance de 320 kilowatts, le facteur de puissance de l'ensemble, $\cos \varphi = 0,8$. D'autre part, l'éclairage absorbe 180 kilowatts avec un facteur de puissance de 0,9 dû à la présence de transformateurs (1). Sachant que la tension entre fils de ligne à l'entrée de*

(1) Les transformateurs étant nécessaires pour desservir les lampes à 120 volts qui ne peuvent être alimentées directement par la haute tension, le facteur de puissance qui serait égal à 1 sans cela prend une valeur qui dépend du nombre de transformateurs utilisés.

la station réceptrice est de 25 000 volts et la fréquence des courants de 50 périodes par seconde, calculer la ligne de façon que la perte de puissance ne représente que 5 p. 100 de la puissance reçue. Calculer la tension au départ de l'usine et le facteur de puissance général.

Formons le tableau des puissances réelles, magnétisantes, apparentes, nous avons tout ce qu'il faut pour faire ce calcul avec les données du problème. Nous aurons :

		PUISSANCE réelle en kilowatts	PUISSANCE magné- tissante	PUISSANCE apparente en kilovolts- ampères
Station réceptrice	Moteurs	320	240	400
	Lampes	180	87	200
	Total	500	327	597,5

Faisons encore remarquer (on ne saurait trop insister sur ce point) que l'on ne peut faire la somme arithmétique que pour les quantités correspondant à un même vecteur (puissances réelles ou magnétisantes). On doit ajouter géométriquement les vecteurs de direction différente tels que ceux des puissances apparentes, ainsi dans le cas ci-dessus.

La puissance apparente totale $597,5 = \sqrt{500^2 + 327^2}$ et ne correspond pas à la somme $400 + 200$.

La puissance apparente étant de 597,5 kv-A ou 597 500 volts-ampères, l'intensité du courant dans chaque fil de ligne sera :

$$I_{\text{eff}} = \frac{597\,500}{225\,000 \times \sqrt{3}} = 13,8 \text{ ampères.}$$

La perte en ligne ne doit pas dépasser 5 p. 100 de la puissance réelle reçue, c'est-à-dire $0,05 \times 500 = 25$ kilowatts. La puissance magnétisante pourrait

paraître nulle, en réalité il en existe une, surtout sur une ligne de 60 kilomètres. En effet, entre deux quelconques des fils parcourus par le courant, s'établit un champ magnétique et l'établissement de ce champ se traduit toujours par de la self-inductance.

Pour des fils de ligne distants de 0,40 m parcourus par des courants alternatifs à la fréquence 50, l'inductance kilométrique est de 0,3 ohm.

Pour les 3 fils, sur 60 kilomètres l'inductance totale sera de :

$$3 \times 60 \times 0,3 = 54 \text{ ohms.}$$

Ce qui représente, lorsqu'il circule un courant de 13,8 ampères, une puissance magnétisante de $54 \times 13,8^2 = 10\,300 \text{ V-Ar}$ (par analogie à la perte de puissance par RI^2).

A la station génératrice, nous aurons donc à fournir :

	PUISSANCE réelle en kilowatts	PUISSANCE magnétisante	PUISSANCE apparente en kilovolts- ampères
Station réceptrice	500	327	597,500
Ligne	25	10,3	
Station génératrice	525	337,3	623,8

La puissance apparente à développer de 623,8 kilovolts-ampères correspondra à une tension efficace entre fils de :

$$E_{\text{eff}} = \frac{623\,800}{13,8 \times \sqrt{3}} = 26\,000 \text{ volts,}$$

l'intensité du courant étant toujours de 13,8 ampères.

La chute de tension est de 1 000 volts, soit 3,75 p. 100.

Le facteur de puissance général :

$$\cos \varphi = \frac{525}{623,8} = 0,84.$$

Calcul des fils de ligne. — La puissance perdue dans les 3 fils de ligne étant de 25 kw., soit 25 000 watts, il suffit d'écrire :

$$3 RI^2 = 25\ 000, \text{ d'où } R = \frac{25\ 000}{3I^2}.$$

Or, $I_{\text{eff}} = 13,8$; en remplaçant, on a :

$$R = \frac{25\ 000}{3 \times 13,8^2} = 43,8 \text{ ohms.}$$

Le fil de cuivre qui a 43,8 ohms sur 60 kilomètres de longueur a pour section :

$$S = \frac{al}{R} = \frac{0,016 \times 60\ 000}{43,8} = 21,8 \text{ mm}^2$$

formule dans laquelle a est la résistivité du cuivre (1) (nous avons pris pour a la valeur 0,016), l la longueur de la ligne, soit 60 kilomètres, R la résistance en ohms représentée par un fil ayant environ 5,4 millimètres de diamètre.

La densité de courant dans les fils de ligne sera de :

$$\frac{13,8}{21,8} = 0,63 \text{ A : mm}^2.$$

Cette valeur est faible, en général on préfère faire travailler les fils aux environs de 1 ampère par millimètre carré; la ligne coûte moins cher, mais la perte d'énergie y est plus considérable.

Règle de Lord Kelvin. — Cette règle, qui a pour but de déterminer dans chaque cas la ligne la plus écono-

(1) Voir le tome 1 des *Leçons pratiques d'électricité industrielle (Le courant continu)*, p. 54.

mique, se résume à établir une ligne dans laquelle le prix annuel des pertes d'énergie électrique dans les fils est le même que le taux annuel d'amortissement de la même ligne.

Quoique très simple en principe, cette règle est d'une application difficile, parce que l'on connaît rarement le prix de revient exact de l'énergie électrique, ce qui fait qu'en fin de compte le calcul se résume à celui que nous avons donné, c'est-à-dire celui qui donne lieu à une perte de puissance consentie d'avance. La valeur de cette perte variera suivant que l'énergie sera fournie par des chutes d'eau ou par des usines à vapeur.

CHAPITRE V

Les transformateurs

C'est Gaulard qui créa, vers 1880, le premier transformateur industriel caractérisé par la présence de deux enroulements sur un même noyau de fer. L'appareil était calqué sur la bobine de Ruhmkorff, mais il présentait cette différence que, tandis que dans la bobine d'induction le circuit magnétique était ouvert (constitué par un faisceau droit de fils de fer), dans l'appareil de Gaulard le circuit magnétique était fermé, ce qui permettait au système de fonctionner assez économiquement avec les courants alternatifs industriels. Gaulard avait donné le nom de générateur secondaire à son appareil; ce fut plus tard Hospitalier qui créa le mot *transformateur*, universellement employé aujourd'hui pour désigner cette catégorie d'appareils

Transformateur de courant alternatif simple.

— Le transformateur est une des machines électriques les plus simples que l'on puisse imaginer. Deux bobines entourant le même noyau de fer, et c'est tout. Le mécanisme du fonctionnement est aussi très facile à comprendre : si l'on envoie un courant alternatif dans l'un des deux enroulements, ce courant crée dans le noyau de fer un flux magnétique, qui est

alternatif lui aussi, et comme le deuxième enroulement est sous l'influence de ce flux, puisqu'il est monté sur le même noyau de fer, une force électromotrice alternative prend naissance dans cet enroulement en vertu des lois de l'induction.

Si nous fermons le circuit du deuxième enroulement sur des lampes, par exemple, le courant induit va circuler et fera briller nos lampes, mais ce courant, en vertu de la loi de Lenz, est de sens tel qu'il tend à s'opposer à la variation du flux, c'est-à-dire que le flux qu'il développera lui-même (tout courant crée un flux) s'opposera constamment au flux principal fourni par le premier enroulement. Pour le dominer et maintenir le flux à sa valeur primitive, le premier enroulement va donc absorber plus de courant alternatif, ce que l'on constatera aisément en intercalant un ampèremètre dans le circuit de ce premier enroulement que nous appellerons *le primaire*, en réservant le mot *secondaire* au deuxième enroulement.

En somme, à vide, lorsque le secondaire ne débite pas, le primaire seul reçoit du courant et il se comporte dans ces conditions comme une simple bobine de self-inductance, c'est-à-dire qu'il se produit dans cet enroulement une force contre-électromotrice de self-induction qui évite d'avoir un courant intense (1).

Puis, si l'on fait débiter le secondaire, le courant ainsi obtenu produit un flux de « réaction », si nous pouvons nous exprimer ainsi, qui tend à diminuer le flux principal; la force contre-électromotrice dans le primaire diminue et ce dernier absorbe plus de courant. L'appareil est donc auto-régulateur : à vide

(1) Un transformateur dont la résistance de l'un des enroulements serait de 1 ohm, serait le siège d'un courant de 100 ampères si on lui appliquait une différence de potentiel continue de 100 volts; cependant, avec du courant alternatif à la même tension de 100 volts efficaces, il ne passera même pas un ampère à cause de la force contre-électromotrice.

il ne prend rien ou à peu près, et à mesure que le secondaire débite, il absorbe dans son primaire un courant proportionnel au courant débité.

La figure 72 représente la forme la plus simple que l'on puisse imaginer pour un transformateur. On distingue nettement les deux bobines formant deux enroulements séparés, mais toutes deux font partie du même circuit magnétique constitué par un cadre rectangulaire en fer doux. De même que dans les bobines de réactance on ne peut employer un noyau de fer plein, dans lequel il se développerait par induction des courants intenses, dits courants de Foucault, qui échaufferaient l'appareil et constitueraient une perte inutile,

on prend des feuilles de tôle isolées par du papier ou du vernis. Plus les tôles sont minces, plus faible est la perte par courants de Foucault; cependant on ne descend pas au-dessous de 0,3 mm. parce qu'il en faudrait trop et que, d'ailleurs, l'espace vide tenu par le papier ou le vernis serait alors trop considérable.

Il ne faut pas non plus prendre des tôles trop épaisses; ainsi des tôles de 1 millimètre donnent lieu déjà à des pertes un peu grandes. Nous admettrons que l'on prend des tôles de 3 à 4 dixièmes de millimètre d'épaisseur.

Le transformateur constitué sur le modèle de la figure 72 présenterait industriellement certains inconvénients, d'ailleurs mis à profit dans certaines applications : il est le siège de *fuites magnétiques*.

Lorsqu'on fait débiter le secondaire d'un tel transformateur à bobines éloignées, le flux anta-

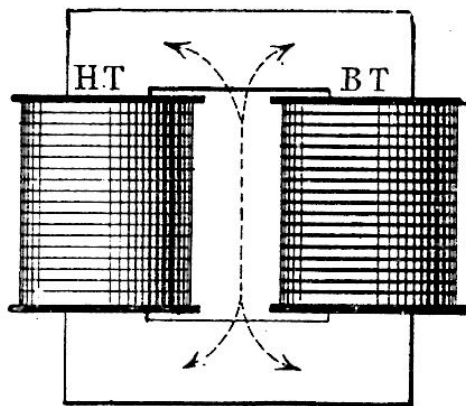


FIG. 72. — Transformateur.

goniste que crée le courant secondaire cherche à combattre le flux principal et il arrive qu'au lieu de circuler dans les noyaux, surtout si ces derniers sont minces et par conséquent saturés de lignes de force, le flux saute à travers l'air entre les deux bobines et se disperse. Ces fuites magnétiques viennent gêner le fonctionnement du transformateur qui n'est plus autorégulateur. Dans les transformateurs modernes on emploie des enroulements soit concentriques, c'est-à-dire sur le même noyau, comme dans l'appareil représenté figure 73, soit des enroulements sandwichés, c'est-à-dire avec une multitude de bobines

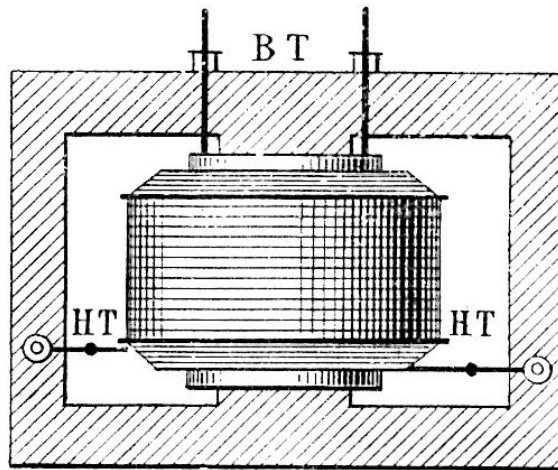


FIG. 73. — Transformateur à enroulements concentriques.

primaires et secondaires alternées (1), afin d'éviter la dispersion du flux.

La disposition de la figure 72 est cependant employée dans certains cas spéciaux, par exemple pour les transformateurs d'essais. Dans ces appareils qui servent à soumettre le matériel électrique en construction à des tensions un peu plus élevées que celles auxquelles ils doivent fonctionner (essai ana-

(1) Voir *les Installations électriques*, par A. SOULIER, p. 212.

logue à celui que l'on fait subir aux chaudières à vapeur), il faut que si l'appareil « claque », c'est-à-dire si l'isolement ne résiste pas, il n'y ait pas passage d'un courant intense qui achèverait de détériorer le matériel. En employant un transformateur tel que celui de la figure 73, on évite cet inconvénient. Tant que le secondaire ne débite pas ou même s'il débite un peu, la tension se maintient; sitôt qu'il y a court-circuit sur le secondaire, les fuites magnétiques entrent en jeu et empêchent que le courant prenne dans le secondaire une valeur dangereuse.

Transformateurs polyphasés. — Avec les courants polyphasés les mêmes principes s'appliquent; il suffit d'employer autant de transformateurs simples que le circuit comporte de phases. Cependant on peut n'avoir qu'un seul bâti de transformateur en remarquant par exemple pour les courants triphasés qu'il suffit d'ac-

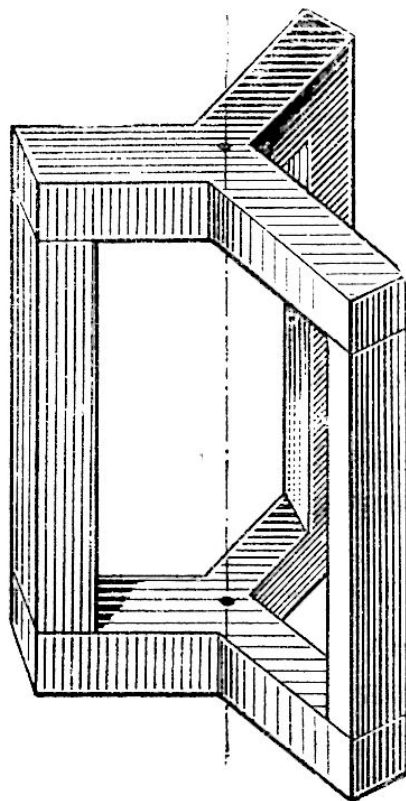


FIG. 74. — Carcasse de transformateur triphasé.

coler trois carcasses de transformateurs monophasés en supprimant les branches centrales (fig. 74). En effet, il s'établit dans ces trois carcasses, du fait des enroulements, trois flux magnétiques alternatifs décalés de un tiers de période comme les courants eux-mêmes; il en résulte que la somme de ces flux est nulle à chaque instant et que, de même que dans le montage en étoile on peut supprimer les fils centraux, de même dans l'assemblage des

trois carcasses on supprimera le retour central commun aux trois flux. Le transformateur triphasé se réduira aux 3 colonnes de la figure 69, ou mieux, à la disposition de la figure 75 qui est la plus généralement employée.

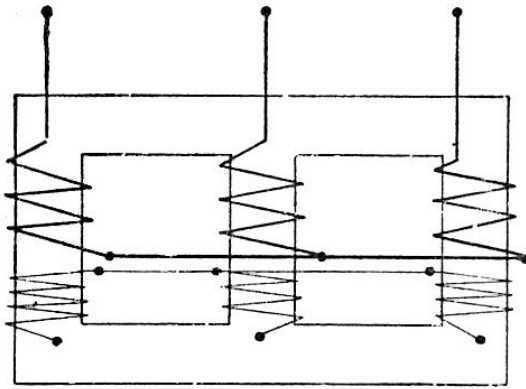


FIG. 75. — Schéma d'un transformateur triphasé monté en étoile.

On revient cependant un peu de cette simplicité de montage et dans bien des cas (lorsque les courants triphasés ne sont pas équilibrés, ce qui arrive souvent) on préfère avoir recours à 3 transformateurs monophasés.

Avec les courants diphasés, on emploiera soit 2 transformateurs monophasés (un sur chaque

Rôle et emploi des transformateurs. — Les transformateurs sont universellement employés aujourd'hui pour passer de la haute à la basse tension et réciproquement. Comme on l'a vu, les pertes

puissance dans les conducteurs des lignes de transmission sont proportionnelles au *carré de l'intensité* ($\text{Perte de puissance} = RI^2$); que le courant soit continu ou alternatif, on a donc intérêt à réduire le plus possible le facteur intensité. Voilà pourquoi,

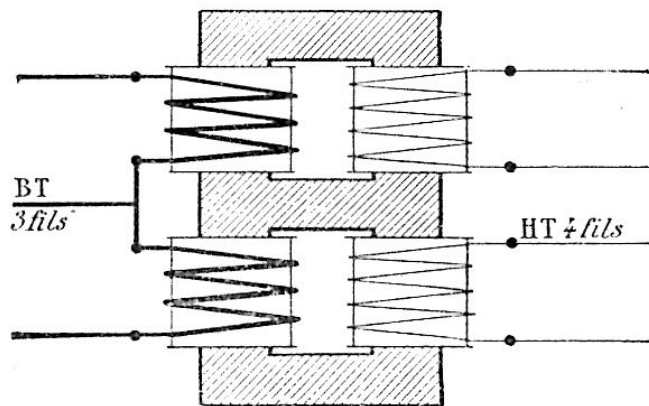


FIG. 76. — Montage d'un transformateur diphasé.

avec le courant continu, on a cherché à faire des distributions à 220 volts, puis à 440 volts, qui mettent en jeu à puissance égale des courants moins intenses que celles à 110 volts, et l'on aurait été plus loin, si l'on avait pu disposer de transformateurs économiques. Il faut bien se rendre compte, en effet, que si l'on va au delà, on court des dangers d'électrocution et le transformateur s'impose.

Avec les courants alternatifs, il n'en va plus de même, grâce au transformateur qui permet d'avoir des circuits à basse tension, nettement séparés, n'ayant aucun contact avec ceux à haute tension et donnant par suite toute sécurité; aussi on a pu se permettre de véritables tours de force. Au début on construisait les transformateurs en vue de réduire la tension de 2 000 volts au primaire à 110 volts au secondaire, puis on est passé à $\frac{10\,000}{110}$, puis à $\frac{12\,000}{110}$

et l'on a pu réaliser des appareils $\frac{25\,000}{110}$ sans trop de difficultés, en faisant cependant baigner dans l'huile les enroulements (fig. 77).

Le transformateur, organe inerte et à bon rendement, se case n'importe où, dans une cave, un grenier, sur des poteaux, etc.; il suffit d'en rendre l'accès inaccessible au public et de prendre les précautions indispensables d'isolement quand on doit les manipuler. C'est ce qui a fait la vogue des distributions d'énergie à courant alternatif qui présentent cependant certains inconvénients, en particulier lorsque leur facteur de puissance ($\cos \varphi$) devient faible. Dans ce cas encore les techniciens ont pu trouver une solution élégante, en leur adjoignant des condensateurs.

Transformateurs de phases. — Il est quelque-

fois utile de passer d'un système de phases à un autre; c'est ainsi que dans certaines villes où l'on distribue des courants diphasés, il peut être avantageux d'avoir en certains endroits des courants triphasés ou inversement.

D'autre fois, pour l'alimentation des commutateurs par exemple, il est préférable d'utiliser des courants hexaphasés, tandis que l'on n'a à sa disposition que des courants triphasés. Il suffit dans chacun de ces cas d'utiliser des transformateurs de

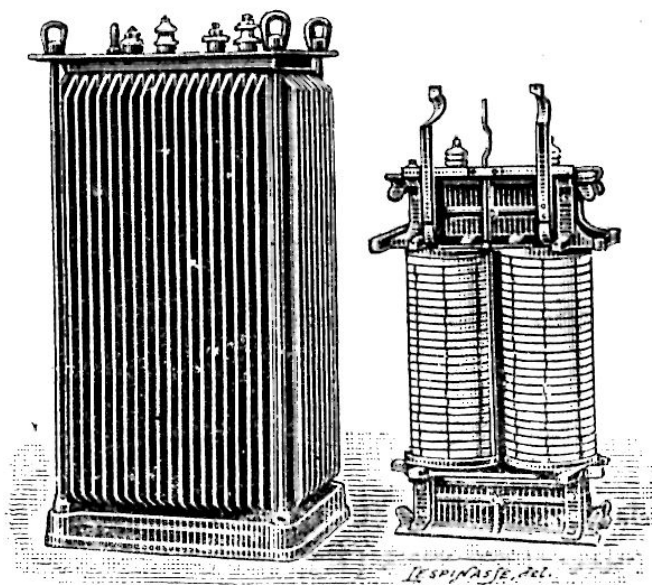


FIG. 77. — Transformateur à cuve d'huile pour hautes tensions et transformateur à air libre.

phases dont le fonctionnement est identique aux transformateurs que nous avons examinés.

1° *Transformateurs hexaphasés.* — Le primaire de ces transformateurs sera, par exemple, celui d'un transformateur triphasé ordinaire monté soit en triangle, soit en étoile; celui de la figure 78 est monté en triangle au primaire et en étoile hexaphasé au secondaire. Le secondaire comporte trois enroulements : *de*, *fg*, *hk*, mais ces derniers ont leurs extré-

mités libres, les points milieux de ces bobinages sont seuls reliés ensemble, ils constituent le point neutre de la distribution hexaphasée dont les fils de phase sont représentés par *de*, *fg*, *hk*. Ce montage est du type étoilé, mais on peut réaliser un groupement triangulaire en ouvrant les bobines au centre et en les couplant convenablement (fig. 79).

2° *Transformation des courants triphasés en courants diphasés.* — Le passage des courants triphasés

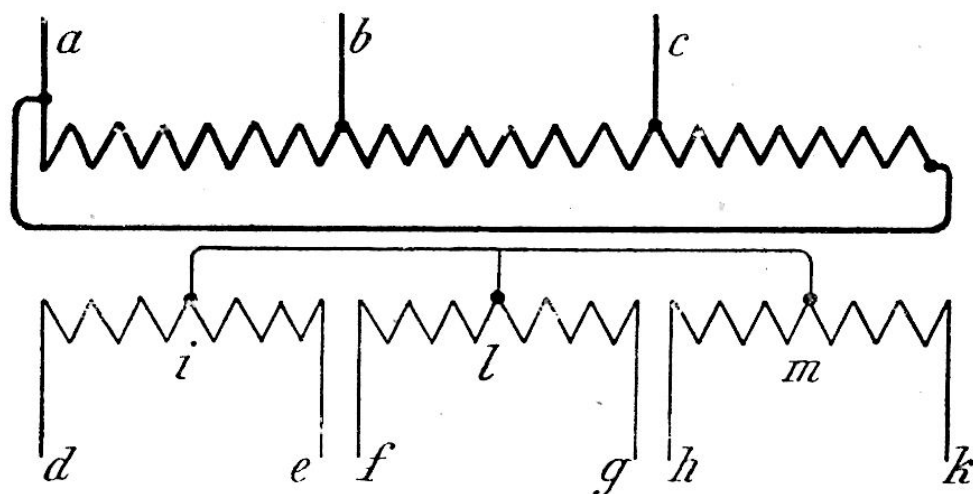


FIG. 78. — Transformateur triphasé triangle au primaire, hexaphasé étoile au secondaire.

aux courants diphasés et inversement se réalise à l'aide du *montage Scott* qui repose sur le principe suivant.

Si, dans un système triphasé, on inverse l'une des phases et qu'on la compose avec sa voisine, on obtient un courant résultant qui est décalé de 90° par rapport à la phase restante.

Pour s'en rendre compte, il suffit de considérer (fig. 80) les 3 vecteurs *OA*, *OB*, *OC* d'un système triphasé. Invertissons l'une des phases. *OC* par exemple, nous aurons transformé le système symétrique en un nouveau système *OB*, *OC'*, *OA* tel que les angles de

décalage sont de 60° (puisque OC' est la bissectrice de l'angle AOB , qui est égal à 120°).

Composons OC' avec OA ; pour cela traçons le parallélogramme des forces $OADC'$. La résultante

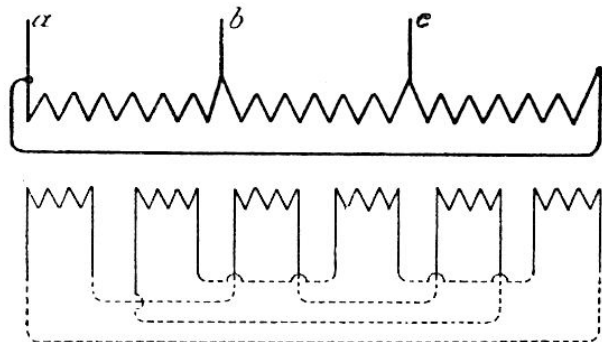


FIG. 79. — Transformateur triphasé triangle au primaire, hexaphase triangle au secondaire.

OD est perpendiculaire à OB . En effet, les composantes OA , OC' étant égales, la résultante est la bissectrice de l'angle qu'elles forment, ce qui permet

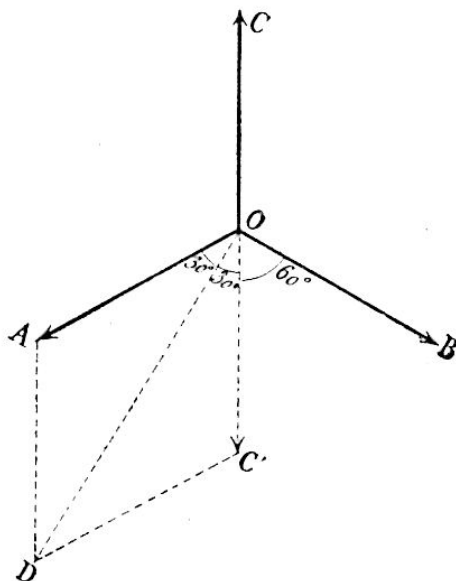


FIG. 80. — Diagramme montrant le passage d'un système triphasé à un système diphasé.

de dire que les angles AOD et DOC' valent chacun la moitié de 60° , soit 30° ; mais comme $C'OB$ vaut déjà 60° , l'angle $DOB = 60^\circ + 30^\circ = 90^\circ$.

On remarquera seulement que si les nouveaux vecteurs OD et OB sont bien à 90° , ils ne sont pas égaux en valeur; pour que $OB = OD$, OB devra être multiplié par $\sqrt{3}$, car OD est égal lui-même à l'un des vecteurs OA ou OC' multiplié par $\sqrt{3}$, ainsi qu'il est facile de le voir par un raisonnement analogue à celui indiqué page 161.

Le transformateur de courants triphasés en courants diphasés est basé sur le principe ci-dessus; son schéma est représenté figure 81. Soient A, B, C les 3 points d'un système triphasé. Nous disposerons trois enroulements: l'un OA de 100 spires, par exemple, sera monté sur le même noyau de fer que son voisin OC de 100 spires lui aussi. Ces deux phases travaillant sur le même noyau de fer, donneront un flux résultant qui sera en quadrature avec le flux donné par la phase B dans un enroulement voisin DE disposé sur un deuxième noyau de fer. Enfin, conformément à la remarque faite en dernier lieu sur l'inégalité des vecteurs on donnera à l'enroulement OB 173 spires, de façon à rétablir l'équilibre. De cette façon, si l'on dispose sur chacun des noyaux de fer deux enroulements FG et DE à nombre égal de spires, ces enroulements seront le siège de forces électromotrices *diphasées*.

Réciproquement, si l'on envoie des courants diphasés dans les enroulements DE et FG, on recueillera de l'autre côté des courants triphasés.

Remarque. — On a assez fréquemment l'occasion d'employer le montage Scott tel que nous venons de le décrire; bien entendu, les enroulements ne comportent pas, l'un 100, l'autre 173 spires, mais des multiples ou des sous-multiples de ces nombres. De plus, si l'on ne veut pas avoir d'ennuis, on devra prendre un soin tout particulier à éviter les fuites magnétiques, car il est facile de voir que, dans la

branche AOC commune aux deux phases, les courants sont à certains moments en opposition; il tend donc à se produire des fuites qui détruisent l'équilibre du système. Pour cette raison, on devra superposer avec beaucoup de soin les enroulements et surtout prendre de grandes sections de fer, afin d'éviter la saturation.

En dehors du montage Scott, il en existe d'autres, en particulier le montage Leblanc qui utilise un transformateur triphasé ordinaire.

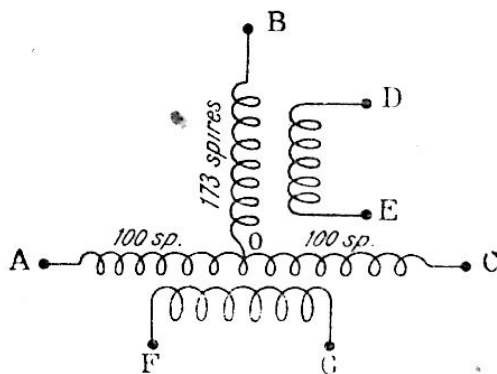


FIG. 81.

Schéma du dispositif Scott pour le passage d'un système triphasé à un système diphasé.

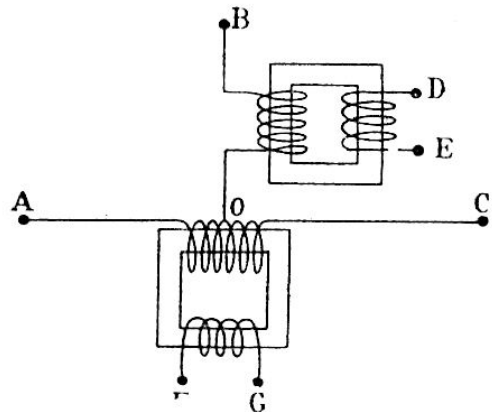


FIG. 82.

Montage de Leblanc pour la transformation des courants triphasés en courants diphasés et inversement. — Ce montage (fig. 83) consiste à prendre un transformateur triphasé ou trois transformateurs monophasés. Le primaire que nous n'avons pas figuré est supposé monté en triangle ou en étoile pour recevoir les courants triphasés, le secondaire est organisé comme l'indique le schéma ci-dessus, c'est-à-dire que l'on constitue une des phases du diphasé avec l'enroulement A pris sur une des branches I auquel on ajoute deux portions d'enroulement B et C pris sur les branches 2 et 3. Les deux composantes fournies par ces enroulements B et C

donnent une résultante qui s'ajoute au vecteur A comme l'indique le diagramme placé à droite.

Sur les branches 2 et 3, on prend les enroulements D et E restants qui, si le *sens* et le *nombre* de spires sont convenables, donnent une résultante b à 90° avec a (1).

Transformateurs de mesures. — En dehors de leur application générale comme appareils éléva-

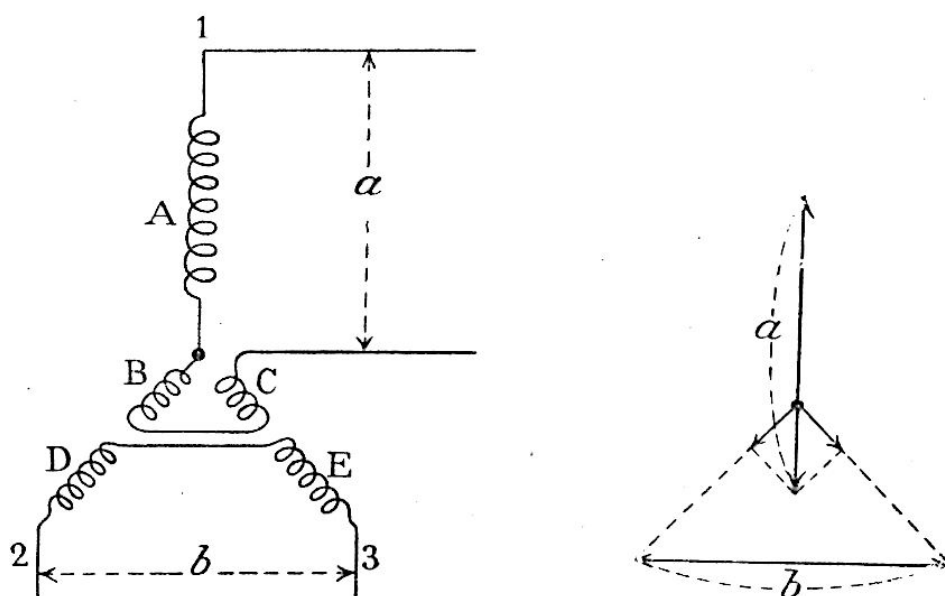


FIG. 83. — Montage Leblanc et son diagramme.

teurs ou abaisseurs de tension dans les transmissions d'énergie électrique, les transformateurs sont utilisés dans un grand nombre d'applications moins importantes, mais leur rôle est toujours le même, celui d'approprier la tension distribuée à celle de l'application que l'on a en vue. Citons en passant les *transformateurs de mesure* employés dans les usines électriques à haute tension pour desservir les ampèremètres, volt-mètres, wattmètres des tableaux; leur

(1) Voir à ce sujet le *Formulaire pratique d'électricité* par A. SOULIER, p. 140, Garnier, éditeur.

but est encore ici de n'introduire sur ces derniers appareils que des courants à basse tension. La figure 84 montre la coupe des bobines d'un transformateur de ce genre; les bobines à haute tension sont en

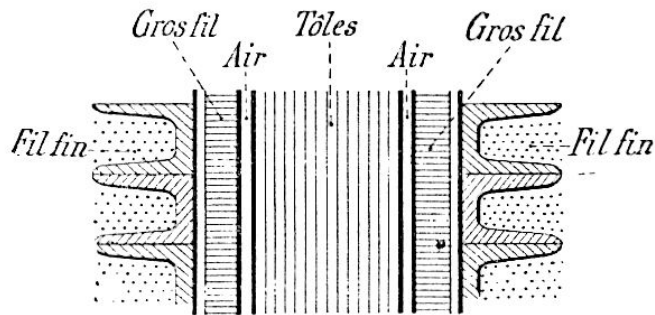


FIG. 84. — Montage des transformateurs pour mesures.

porcelaine, elles forment des galettes comme dans la bobine de Ruhmkorff. De même, les médecins emploient, pour faire chauffer leurs thermocautères, des transformateurs du même ordre de grandeur prenant le courant à 110 volts ou à 200 volts du réseau et n'admettant sur l'appareil que des courants intenses mais à basse tension, etc.

CHAPITRE VI

Calcul complet d'un transformateur

Avant de quitter le sujet si important des transformateurs, nous donnerons à titre d'exemple le calcul complet de l'un de ces appareils; nous prendrons le cas le plus général et le plus répandu d'un transformateur *triphase*. Une fois en possession de la méthode de calcul, il sera facile, en la suivant, d'établir un transformateur monophasé beaucoup plus facile à déterminer.

Données. — Le transformateur triphasé que nous nous proposons de calculer devra pouvoir répondre aux spécifications suivantes :

Tension primaire entre fils en <i>volts</i> efficaces	10 000
Tension secondaire entre fils — — ..	120
Fréquence du courant en <i>périodes</i> par seconde	50
Puissance réelle en <i>kilowatts</i>	75
Facteur de puissance (secondaire) $\cos \varphi$..	0,8
Rendement approximatif à obtenir	0,96
Montage des circuits	en triangle

Marche des calculs. — Ce transformateur étant du genre de ceux que l'on installe dans les usines un peu importantes desservies par une ligne triphasée à haute tension, nous pouvons admettre qu'il marche

presque toute la journée à pleine charge et ainsi qu'on le fait dans ce cas, nous supposons que les pertes dans le cuivre (par effet Joule RI^2 dans les enroulements) sont égales aux pertes dans le fer (hystérésis et courants de Foucault).

Par raison de symétrie, les pertes dans le cuivre seront réparties par moitié entre le primaire et le secondaire.

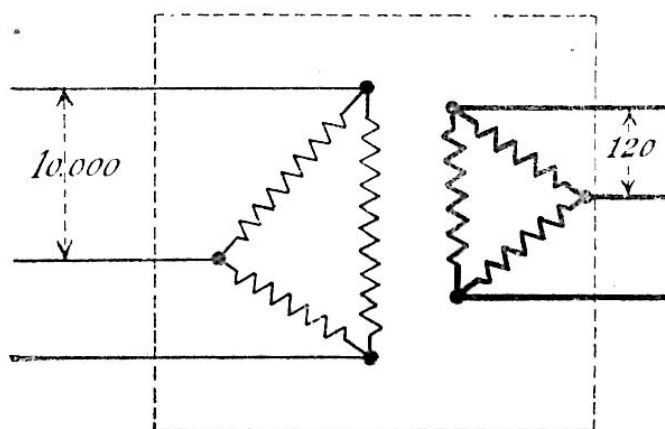


FIG. 85. — Schéma du transformateur.

Le rendement que nous nous sommes imposé étant de 96 p. 100, les pertes représenteront 4 p. 100 de la puissance réelle, c'est-à-dire :

$$75 \times 0,04 = 3 \text{ kilowatts.}$$

Comme nous les répartissons à parties égales entre le fer et le cuivre, nous aurons :

Pertes dans	}	le fer.....	1 500 watts.
		le cuivre.....	1 500 watts.

Et dans chaque enroulement primaire et secondaire nous devons absorber la moitié de 1 500 watts, soit 750 watts.

Avant d'aller plus loin, formons le tableau bien connu des puissances réelles, magnétisantes et apparentes, nous basant sur ce que l'on doit pouvoir disposer d'une puissance *réelle* à la sortie du trans-

formateur de 75 kilowatts, soit 75 000 watts (aux bornes à 120 volts).

La puissance apparente avec un facteur de puissance de 0,8 sera telle que, multipliée par 0,8 elle donne 75 000, c'est-à-dire qu'elle sera :

$$P_{\text{app}} = \frac{75\ 000}{0,8} = 94\ 000 \text{ volts-ampères.}$$

Mais dans l'enroulement à basse tension lui-même, il y a une perte par effet Joule que nous avons consentie et qui doit être de 750 watts.

La puissance réelle devra donc être augmentée de ce chiffre.

Ce n'est pas tout : le fer du transformateur absorbe de l'énergie, une partie est prise par l'aimantation et la désaimantation du noyau (hystérésis) (1), l'autre est absorbée par les courants induits dans les feuilles de tôle elles-mêmes (courants de Foucault); nous devons donc prévoir, dans la colonne de la puissance réelle, 1 500 watts.

Enfin, l'enroulement à haute tension perd lui-même par effet Joule 750 watts, ainsi que nous l'avons établi; cela fait 750 watts à introduire encore dans l'addition. Nous pouvons maintenant former le tableau qui doit servir de base à notre calcul.

Nous avons maintenant tous les éléments pour calculer notre transformateur.

La puissance apparente à fournir au secondaire (circuit à 120 volts) étant de 93 500 volts-ampères (ne confondons pas avec la puissance à la sortie du secondaire), le courant dans chacune des trois bobines de ce circuit sera :

$$I = \frac{93\ 500}{120 \times \sqrt{3}} = 450 \text{ ampères.}$$

(1) Voir les leçons pratiques d'électricité industrielle (*Le courant continu*), par A. SOULIER, 1^{re} partie, p. 249.

Puissance dans les différentes parties du transformateur	Puissance réelle en watts	Puissance magnétisante	Puissance apparente en volts-ampères
Aux bornes du circuit basse tension à 120 volts.	75 000	$\sqrt{94\,000^2 - 75\,000^2} = 56\,200$	94 000
Perte par effet Joule dans le circuit à 120 volts.	750	»	»
Puissance à fournir au secondaire.	75 750	56 200	$\sqrt{75\,750^2 + 56\,200^2} = 93\,500$
Puissance perdue dans le fer.	1 500	4 000 (1)	—
Puissance perdue par effet Joule dans le circuit à 10 000 volts.	750	—	—
Puissance totale à fournir à l'entrée du primaire.	78 000	$56\,200 + 4\,000 = 60\,200$	$\sqrt{78\,000^2 + 60\,200^2} = 98\,000$

Cette intensité se déduit en effet de la formule

$$P = EI\sqrt{3}. \text{ Nous en tirons } I = \frac{P}{E\sqrt{3}}.$$

A l'entrée du transformateur, nous devons fournir une puissance apparente de 98 000 volts-ampères, l'intensité du courant dans chacune des trois bobines du circuit à haute tension sera :

$$i = \frac{98\,000}{10.000 \times \sqrt{3}} = 5,6 \text{ ampères.}$$

(1) Ce chiffre est choisi d'après les résultats recueillis sur des transformateurs analogues, on le modifiera s'il y a lieu (V. p 203).

Circuit magnétique. — Pour déterminer le circuit magnétique on se donnera une induction maximum dans le noyau de fer; nous la prendrons, par exemple telle que $\mathfrak{B} = 8000$ gauss, valeur qui est normale et pour lesquelles les pertes par hystérésis et courants de Foucault dans une tôle ordinaire sont de 2,4 watts par kilogramme à la fréquence de 50 périodes par seconde. Cela va nous permettre de prévoir dès maintenant le poids de la carcasse magnétique, car nous avons admis une perte totale dans le fer de

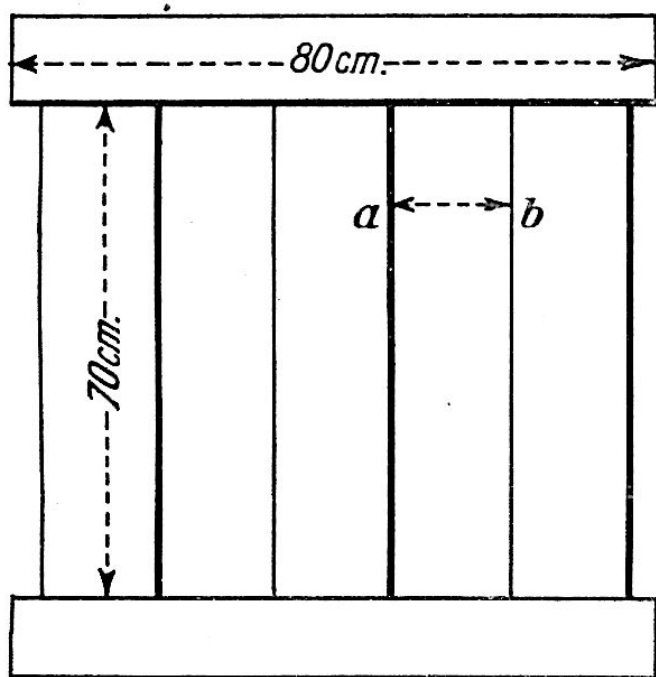


FIG. 86. — Circuit magnétique du transformateur.

1500 watts ce qui correspond à raison de 2,4 watts par kilogramme à $\frac{1500}{2,4} = 625$ kilogrammes. Connaissant le poids, on dessinera la carcasse (fig. 86) en s'inspirant des formes employées pour les transformateurs de ce genre. La figure 86 représentera

à peu de chose près notre circuit magnétique. Par tâtonnements on lui donnera des dimensions telles que le poids total soit de 625 kg. Dans le cas actuel ce résultat sera obtenu avec 3 noyaux de 70 centimètres de longueur et de 2,5 décimètres carrés de section.

Pour conserver la même induction maxima $\mathcal{B}_{\max} = 8\,000$ gauss dans les culasses, nous devons leur donner une section utile de $\frac{2,5}{\sqrt{3}} = 1,44 \text{ dm}^2$

En effet, le flux émanant de chaque noyau se répartit dans les deux autres, exactement comme le courant d'une ligne triphasée aboutissant à l'un des sommets d'un montage en triangle se répartit dans chaque branche du triangle dans la proportion $\frac{i}{\sqrt{3}}$ ainsi que nous l'avons vu page 161. La longueur des culasses pourra être prise de 80 centimètres quitte à la modifier si par la suite du calcul les circonstances l'exigent (1).

Le poids de la carcasse magnétique du transformateur s'évalue de la façon suivante :

1^o Volume total des 3 noyaux $3 \times 0,7 \times 0,025 = 0,0525$ mètre cube;

2^o Volume total des deux culasses $2 \times 0,8 \times 0,015 = 0,024$ mètre cube soit en tout 0,0765 mètre cube de fer de densité 7,8 ou 76,5 décimètres cubes $\times 7,8 = 595$ kilogrammes, soit 600 kg en chiffre rond.

(1) *Remarque.* — Il faut bien se rendre compte que, de même que cela arrive dans le calcul des machines dynamo-électriques, ce n'est que par approximations successives que l'on peut déterminer une machine électrique ou un transformateur répondant à des conditions données. Il arrive souvent que, pour faire cadrer les résultats obtenus, l'on soit obligé de recommencer le calcul ou tout au moins de le remanier. Il ne faut pas se décourager pour cela, car tout le calcul du matériel électrique est toujours conduit ainsi.

Nombre de spires. — Pour déterminer le nombre de spires nous appliquerons la règle des 2,2 volts.

Nous dirons : si, dans une spire de 1 décimètre carré de surface enroulée autour d'un noyau de fer dans lequel l'induction maximum est de 10 000 gauss avec une fréquence de 50 périodes par seconde, la force électromotrice efficace induite est de 2,2 volts, avec une spire de 2,5 dm² et une induction maximum de 8 000 gauss on aura :

$$2,2 \times 2,5 \times \frac{8\ 000}{10\ 000} = 4,4 \text{ volts.}$$

La tension appliquée à l'enroulement primaire étant de 10 000 volts, cet enroulement devra avoir :

$$\frac{10\ 000}{4,4} = 2\ 272 \text{ spires.}$$

Le secondaire qui doit fournir 120 volts aura $\frac{120}{4,4} = 28$ spires, mais pour compenser les chutes de tension on prendra 33 spires et on prévoiera des prises d'adaptation sur le primaire permettant de modifier la tension secondaire de ± 5 pour 100 ou plus, si on le veut.

1° *Enroulement primaire.* — Fixons provisoirement la densité de courant à 2 A : mm² le fil de l'enroulement à haute tension devra avoir une section de $\frac{5,6}{2} = 2,8$ mm² puisque l'intensité du courant dans chaque branche des circuits à haute tension a été évaluée à 5,6 ampères (p. 196) On pourra prendre un fil (de cuivre) de 19/10 de millimètre de diamètre, soit 22/10 recouvert de 2 couches de coton.

Chaque noyau de fer ayant 2,5 dm² de section peut être représenté par un carré de 16 cm de côté qui s'inscrit dans un cercle représentant la spire

moyenne. On peut donner à cette spire un diamètre moyen de 30 centimètres, on en déduit sa longueur moyenne qui sera de 90 centimètres.

Les 2272 spires que comporte chaque enroulement primaire correspondront donc à une longueur totale de 2 045 mètres. La densité de courant admise étant de 2 A : mm² cela correspond à une chute de tension de 1 volt par 30 mètres (1)

La perte correspondante en watts dans chacun des 3 enroulements primaires sera de $68 \times 5,6 = 381$ watts et pour les 3 enroulements : $3 \times 381 = 1143$ watts. Or étant donné qu'on a fixé dès le début la perte à 750 watts dans le primaire on devra modifier la densité de courant qui devra être inversement proportionnelle à la perte, elle devra être de $2 \times \frac{750}{1143} = 1,3$ A : mm².

La section du fil de l'enroulement primaire deviendra $\frac{5,6}{1,3} = 4,3$ mm² représentée par un fil de 23/10 de millimètre de diamètre, soit 25/10 recouvert de coton.

2° ENROULEMENT SECONDAIRE. — Le courant dans chacun des trois enroulements formant le secondaire étant de 450 ampères pour la section du conducteur constituant cet enroulement sera de $\frac{450}{1,3} = 340$ millimètres carrés.

REMARQUE. — Il est bon de faire remarquer ici que la section de 340 millimètres carrés de l'enroulement à basse tension ne pourra être obtenue avec

(1) Voir le *Formulaire pratique de l'électricité* par A. SOULIER, p. 220 soit pour les 2 045 mètres à $\frac{2045}{30} = 68$ volts.

un câble unique ou même une barre unique car il se développerait des courants de Foucault dans ce gros conducteur; on est alors conduit à employer soit plusieurs câbles isolés et montés en parallèle, soit, ce qui tient moins de place des rubans de cuivre plats isolés chacun de leur voisin et montés en parallèle réalisant ainsi un enroulement subdivisé en plusieurs autres ayant exactement chacun 32 spires et reliés aux mêmes bornes. D'autre part, étant donné la faible tension que l'on désire avoir sur ce secondaire, (120 volts) l'isolement des spires plates de cuivre constituant l'enroulement pourra être obtenu par des rubans de toile vernie.

Résumé. — Finalement nous aurons :

Sur chaque noyau, un enroulement à haute tension de 2272 spires, formé par 10 couches de 227 spires chacune en fil de cuivre de 25/10 de millimètre de diamètre, y compris le guipage. L'épaisseur des 10 couches sera donc de $2,5 \times 10 = 25$ mm et avec les rubans entourant chaque galette (fig. 80) nous compterons sur une épaisseur de 30 mm soit 3 centimètres.

L'enroulement secondaire à basse tension représentant sensiblement le même poids de cuivre aura lui aussi une épaisseur analogue, soit 3 centimètres. Nous réserverons 1 centimètre pour la ventilation ou la circulation de l'huile entre les deux enroulements, ce qui portera l'épaisseur totale des 2 enroulements à 7 centimètres. Tout compte fait il devra y avoir 16 centimètres d'espace libre entre 2 noyaux, espace occupé d'une part par l'épaisseur des deux enroulements, soit $2 \times 7 = 14$ centimètres et par l'intervalle de libre de 2 centimètres séparant les enroulements de deux noyaux voisins (fig. 87).

Il en résulte que les culasses devront avoir comme longueur :

— 3 fois la largeur d'un noyau, soit $3 \times 16 = 48$ centimètres;

— 2 fois l'espace libre de 16 centimètres entre deux noyaux = 32 centimètres,

soit au total $48 + 32 = 80$ centimètres.

Courant à vide. — Pour entretenir une induction de 8 000 gauss dans les noyaux il faut (1) 1,65 ampères

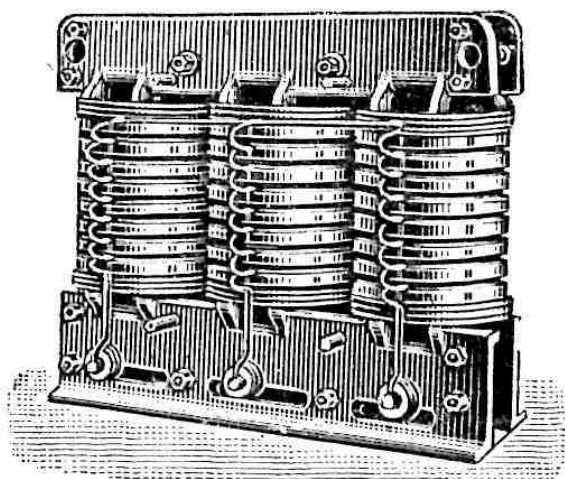


FIG. 87. — Vue d'ensemble du transformateur terminé.

tours par centimètre, or la longueur d'un circuit magnétique partiel se compose :

du noyau, longueur 70 centimètres,

du tiers des deux culasses ($1/3$ de 80×2), soit 53 centimètres.

Le circuit partiel aura donc 123 centimètres, réclamant $123 \times 1,65 = 203$ A-t. Il y a en outre 2 joints, un à chaque extrémité du noyau dont on évaluera l'entrefer de chacun à environ 2 dixièmes de millimètre. Etant donné qu'il faut 6 400 ampères-tours par centimètre pour entretenir une induction

(1) Voir le *Formulaire pratique de l'électricité* par A. SOULIER, p. 74.

de 8 000 gauss dans l'air, il faudra $0,02 \text{ cm} \times 6\,400 = 128$ ampères-tours par entrefer et pour les 2 entrefers 256 ampères-tours.

Le nombre total d'ampères-tours pour maintenir une induction de 8 000 gauss sera donc de $203 + 256 = 459$ ampères-tours. Pour avoir le nombre d'ampères-tours efficaces on devra diviser 459 par $\sqrt{2}$ d'où on déduit que pour maintenir une induction variant de $+ 8\,000$ gauss à $- 8\,000$ gauss dans le circuit magnétique partiel il faut $\frac{459}{\sqrt{2}} = 328$ ampères-tours efficaces, et comme le primaire comporte 2272 tours de fil, le courant efficace qui le traversera sera de $\frac{328}{2272} = 0,14$ ampère.

Puissance réactive ou magnétisante. — On en déduit que la puissance réactive ou magnétisante sera par noyau $10\,000 \times 0,14 = 1\,400$ volts-ampères et pour les 3 noyaux $3 \times 1\,400 = 4\,200$ volts-ampères, soit sensiblement ce qui avait été prévu, p. 196.

D'autre part la puissance active absorbée à vide se compose de celle qui entretient les pertes dans le fer, soit 500 watts par noyau et les pertes par effet Joule dans l'enroulement primaire, soit environ 50 watts.

La puissance apparente à vide sera, par noyau :

$$P_{\text{app}} = \sqrt{1400^2 + 550^2} = 1\,500 \text{ volts-ampères.}$$

et le courant à vide, par noyau $\frac{10\,000}{1\,500} = 0,15 \text{ A environ.}$

Remarque. — Nous avons prévu un transformateur avec primaire triangle et secondaire triangle, mais il n'y aura rien de changé dans le calcul si,

laissant le primaire en triangle on monte le secondaire en étoile. Dans ce cas la tension sur les 3 fils de distribution partant du secondaire passera de 120 volts à $120 \times \sqrt{3} = 207$ volts. C'est ainsi du reste que se font la plupart des distributions, les lampes étant branchées entre un fil de phase et le neutre de façon à recevoir 120 volts et les moteurs entre les fils de phase où la tension est de 207 volts.

CHAPITRE VII

Les moteurs à courants alternatifs

Les moteurs à courants alternatifs peuvent se diviser en deux classes : les *moteurs synchrones* et les *moteurs asynchrones*. Nous passerons en revue les propriétés de ces moteurs en commençant par les moteurs asynchrones, dont le fonctionnement se rapproche des transformateurs que nous venons d'étudier. En ce qui concerne les détails de construction de ces machines, nous renverrons le lecteur que la question intéresse aux ouvrages spéciaux (1), en raison du peu de place dont nous disposons pour traiter ces questions ici.

Moteurs asynchrones. — Ces moteurs, de construction extrêmement simple, ce qui a fait leur vogue, se composent d'une partie fixe ou *stator*, portant un enroulement en relation avec le réseau d'alimentation, et d'une partie mobile ou *rotor*, qui peut recevoir soit un enroulement fermé sur lui-même (cage d'écureuil), soit un enroulement communiquant par des bagues à un rhéostat extérieur (rotors bobinés). Dans l'un et l'autre cas, ce sont les courants induits

(1) Voir *les Installations électriques et les Moteurs électriques*, par A. SOULIER, Garnier, éditeur.

par le stator dans l'enroulement mobile du rotor qui provoquent la rotation, comme nous allons le voir. On saisit déjà l'analogie qui existe entre le moteur asynchrone et le transformateur, le stator constituant un primaire qui envoie son flux dans un secondaire qui est le rotor. Il se trouve que le secondaire est mobile et a été prévu pour se déplacer à l'intérieur du primaire avec un entrefer aussi petit que possible, mais c'est là toute la différence.

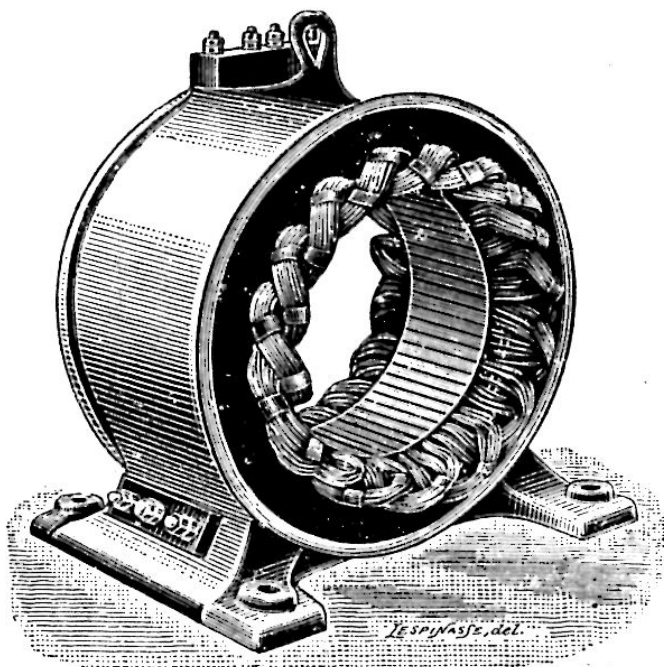


FIG. 88. — Stator d'un moteur triphasé asynchrone.

Fonctionnement. — Prenons le cas d'un moteur asynchrone triphasé. Lorsqu'on relie à un réseau triphasé de tension convenable le stator d'un tel moteur, dont l'enroulement se résume à trois cadres entrelacés dans le genre de ceux de la figure 54, il se développe au centre du bobinage un champ tournant ainsi que nous l'avons vu. Le rotor qui se trouve dans ce champ est le siège de courants induits, lesquels, d'après la loi de Lenz, tendent à s'opposer à la variation. Or, le champ inducteur tourne, et ses lignes de

force coupent constamment les fils formant l'enroulement du rotor; il s'ensuit que si l'on veut que le rotor ne soit le siège d'aucune variation de flux, il

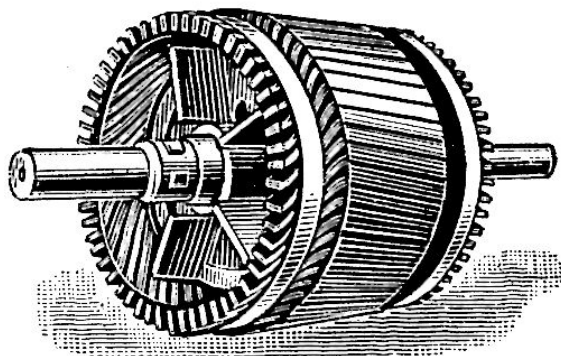


FIG. 89. — Rotor d'un moteur asynchrone.

faudra qu'il ne soit coupé par aucune ligne de force; il devra donc courir après le champ et l'atteindre. Conclusion : le rotor doit tourner dans le champ et

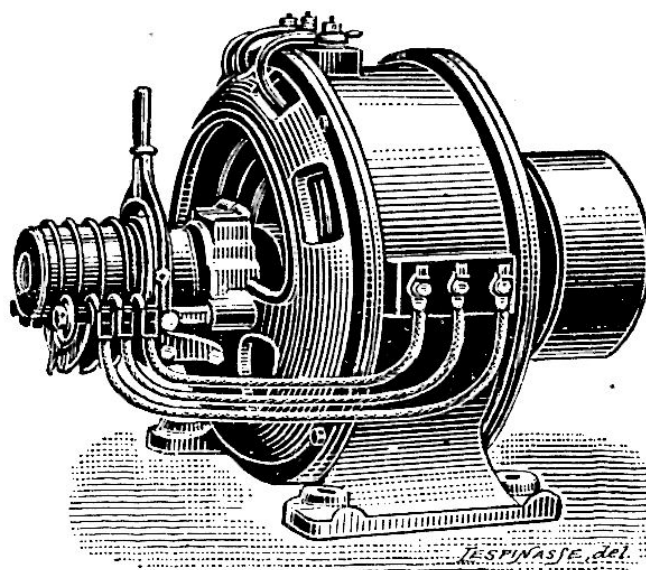


FIG. 90. — Vue d'ensemble d'un moteur triphasé asynchrone.

avec la même vitesse que lui; tel est le résultat de l'application de la loi de Lenz, car c'est le seul moyen que possède le rotor d'échapper aux variations de flux.

Au départ, tandis que le rotor est immobile, dès que l'on admet les courants triphasés dans l'enroulement du stator, l'enroulement du rotor, tout comme le secondaire d'un transformateur fermé sur lui-même, est le siège de courants induits d'autant plus intenses que la résistance de cet enroulement est plus faible. Le noyau de fer autour duquel ce bobinage est fait est, lui aussi, le siège d'un champ magnétique qui réagit, d'après la loi de Lenz, sur le champ inducteur et tend à le combattre. De la réaction de ces deux champs naît un *couple* qui s'exerce entre le stator et le rotor, et le rotor étant la seule partie mobile et entraîné à une vitesse de plus en plus grande jusqu'à ce que, tournant aussi vite que le champ inducteur, il ne soit plus le siège d'aucun courant. A ce moment la loi de Lenz est satisfaite, puisque la variation de flux a disparu dans le rotor. En réalité, cette vitesse est une vitesse théorique qui n'est jamais atteinte en pratique dans les moteurs asynchrones industriels; c'est la vitesse de *synchronisme*. A cause des frottements des paliers, le rotor glisse lentement dans le champ tournant comme le fait une courroie sur une poulie fortement chargée, et sa vitesse se maintient très légèrement en dessous de celle du synchronisme.

Si l'on charge le moteur, le glissement augmente, et si la charge est très forte, il peut arriver que le glissement soit tel que le rotor n'arrive plus à suivre le champ tournant; il cale, et les plombs ou les disjoncteurs sautent, parce que le courant qu'il absorbe à ce moment devient exagéré.

Il est assez curieux de rapprocher le fonctionnement du moteur asynchrone de celui du moteur *shunt* à courant continu.

Dans le moteur à courant continu excité en dérivation, on envoie au moment du démarrage du courant à la fois dans l'inducteur, que l'on relie pour cela

directement au réseau, et dans l'induit à travers un rhéostat dit « de démarrage » (1). Ces courants déterminent deux champs magnétiques, l'un dans l'inducteur, l'autre dans l'induit, qui réagissent l'un sur l'autre pour donner un *couple*. Le moteur démarre et prend une vitesse croissante, on enlève alors progressivement les résistances. La vitesse augmente jusqu'à ce que la force électromotrice développée dans l'induit qui tourne dans le champ fixe de l'inducteur soit égale à la tension du réseau. A ce moment l'induit n'absorbe plus qu'un courant faible, juste celui qui est nécessaire pour vaincre les frottements des paliers, balais, etc.

Vient-on à charger le moteur, il tend à ralentir, sa force contre-électromotrice diminue, il absorbe aussitôt un courant important, mais reste à une vitesse assez voisine de celle qui correspond à la marche à vide. Si la charge est trop forte, la diminution de vitesse devient importante, le courant absorbé aussi et... les plombs sautent, comme dans le cas précédent.

Dans le moteur asynchrone, l'inducteur ou stator et l'induit ou rotor ne sont pas reliés directement à la même source de courant, puisque l'induit est électriquement séparé du stator, mais cela revient au même; tout ralentissement du rotor au-dessous du synchronisme donne plus de valeur aux courants induits, lesquels réagissent sur le stator comme le secondaire réagit sur le primaire dans un transformateur en charge, et il en résulte un appel supplémentaire de courant dans le stator ou primaire; l'analogie entre les deux systèmes de moteurs (shunt et asynchrone) est donc très grande, mais il y a mieux encore.

Générateurs asynchrones. — Il est un fait, en général relativement peu connu, que le moteur asynchrone

(1) *Les Moteurs électriques*, par A. SOULIER, p. 20.

peut devenir générateur si l'on fait tourner son rotor à une vitesse supérieure à celle qui correspond au synchronisme. Mais il ne faudrait pas croire qu'il n'y ait pour cela qu'à mettre une courroie sur le premier moteur asynchrone venu et à le faire tourner à une vitesse supérieure à sa vitesse de régime à l'aide d'un moteur à vapeur ou autre; non, dans ces conditions on n'obtiendra rien aux bornes du moteur. Il faut, et c'est absolument nécessaire, que le stator soit relié déjà à la distribution d'énergie électrique dont les constantes correspondent aux chiffres marqués sur la plaque du moteur, et à cette condition seulement le moteur produira de la puissance électrique qu'il enverra sur la ligne si on le fait tourner à une vitesse supérieure à celle du synchronisme. La présence d'un réseau est nécessaire pour *exciter* le moteur; sans réseau et à moins d'employer des condensateurs, le moteur est incapable de s'exciter lui-même (1). C'est la seule différence notable qu'il y ait avec les moteurs en dérivation à courant continu qui sont auto-excitateurs et indépendants. Ceci bien entendu, nous savons que si l'on accélère par un moyen mécanique la vitesse d'un moteur en dérivation, le courant qui le traverse change de signe et il devient générateur. L'analogie entre le moteur shunt et le moteur asynchrone est complète lorsqu'ils sont chacun reliés au réseau pour lequel ils sont prévus. C'est le cas de certains tracteurs qui deviennent générateurs de courant dans les descentes lorsque les moteurs calés sur les essieux sont soit des moteurs shunt, soit des moteurs asynchrones.

Moteurs asynchrone et transformateur. —
Nous avons dit que le moteur asynchrone présentait

(1) L'auteur a fait fonctionner à l'Exposition de Physique de 1924 un moteur asynchrone de 1 kw rendu auto-exitateur par 3 condensateurs de 50 microfarads.

à première vue de grandes analogies avec les transformateurs; il y a mieux, ils se comportent comme les transformateurs pendant leur fonctionnement.

Considérons un moteur asynchrone tournant à vide, c'est-à-dire sans charge sur sa poulie; si l'on n'avait aucun frottement dans les paliers, le rotor tournerait à la vitesse du champ et les courants induits seraient nuls. Pratiquement, il tourne à une vitesse légèrement inférieure et l'intensité absorbée à ce moment par le stator est appelée « courant à vide ».

Si l'on dispose un ou plusieurs wattmètres, suivant les cas, à l'entrée des fils dans le stator, on obtient la puissance électrique réelle à vide qui est dépensée à compenser : 1° les pertes par hystérésis et courants de Foucault dans le fer, et 2° l'effet Joule dans les fils de l'enroulement (1), exactement comme cela se passe dans un transformateur marchant à vide, c'est-à-dire avec secondaire ouvert. Mais ce n'est pas tout : le stator absorbe comme le transformateur une puissance magnétisante correspondant à un courant magnétisant qui crée le flux dans le fer. Le courant lu sur un ampèremètre intercalé dans les fils d'alimentation du stator est la *résultante* du courant magnétisant et du courant actif qui sert à compenser les pertes.

Chargeons le moteur, c'est-à-dire faisons-lui produire de la puissance mécanique en lui donnant à actionner une machine-outil, par exemple. La vitesse du rotor va diminuer légèrement, il va *glisser* dans le champ, comme glisse la courroie sur une poulie lorsque la charge à entraîner devient forte, des courants induits circuleront dans l'enroulement du rotor et occasionneront des pertes par effet Joule. On voit tout de suite la nécessité qu'il y a de réaliser un enroulement peu résistant si l'on veut voir diminuer ces

(1) Il y aura aussi une fraction de cette puissance absorbée par la résistance de l'air et les frottements du rotor, mais nous la supposons négligeable pour l'instant.

pertes et obtenir un bon rendement. Pour cette raison aucun rhéostat ne doit rester intercalé; on en arrive même à relever les balais et à mettre les bagues en court-circuit pour supprimer les résistances de contact ou de câbles.

Le stator absorbe une nouvelle puissance réelle qui correspond : 1° aux pertes, et 2° à la puissance mécanique fournie par le moteur à la machine qu'il actionne.

Le courant magnétisant reste sensiblement le même s'il n'y a pas de dispersion, c'est-à-dire de fuites magnétiques. En réalité, il y a toujours un peu de dispersion suivant l'épaisseur de l'entrefer. Voilà pourquoi on cherche à rendre dans ces moteurs l'entrefer aussi petit que possible, l'emploi de forts entrefers provoquant un appel considérable de courant magnétisant. En pratique, l'entrefer ne doit pas dépasser 5 dixièmes de millimètre dans ces moteurs.

Calcul des moteurs asynchrones. — Les moteurs asynchrones étant assimilables à des transformateurs on peut s'inspirer pour leurs calculs de celui des transformateurs, mais tandis que l'on peut construire des transformateurs sans outillage compliqué puisqu'on peut se servir de simples bandes de tôle de fer isolées au vernis ou au papier (v. p. 181) il faut au contraire un matériel important pour découper les tôles circulaires plus ou moins dentées entrant dans la constitution des moteurs asynchrones. En outre, pour maintenir l'induit centré dans l'intérieur du stator, libre de se mouvoir, sans frotter, malgré l'entrefer extrêmement réduit (moins d'un millimètre), il est nécessaire de réaliser un montage mécanique extrêmement précis et robuste si l'on songe aux efforts mécaniques dus aux attractions magnétiques qu'aura à supporter le rotor pendant la rotation. Finalement, on arrive à

cette conclusion qu'il est inutile de songer à établir soi-même un moteur asynchrone quel qu'il soit, pour la même raison qu'on n'essaie pas de fabriquer soi-même les épingles ou les clous dont on a besoin que seule une fabrication en série permet d'obtenir à bas prix.

Régulateurs de tension. — Considérons un transformateur (fig. 91) dont le noyau de fer serait coupé en deux, le primaire étant bobiné sur l'une des moitiés, le secondaire sur l'autre moitié, cette der-

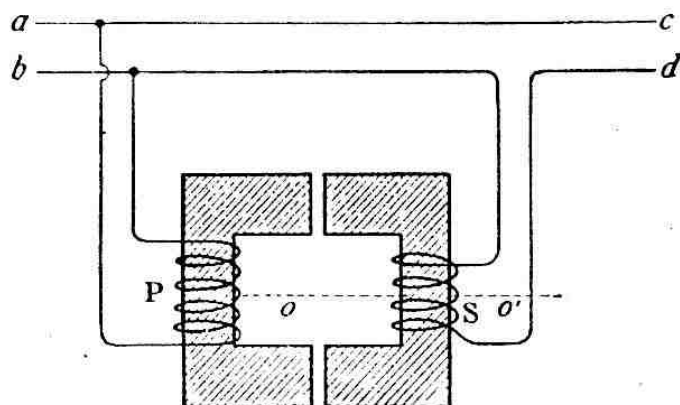


FIG. 91. — Fonctionnement d'un régulateur de tension.

nière pouvant elle-même tourner de 180° (un demi-tour) autour de l'axe oo' . Le primaire P étant relié en dérivation à un réseau à courant alternatif ab , le secondaire S sera monté en *série* avec l'un des fils de ce même réseau. Que va-t-il se passer? De deux choses l'une : ou bien la tension secondaire produite par l'enroulement S s'ajoutera à celle du réseau et l'on aura entre c et d une tension supérieure à celle existant entre a et b , l'appareil sera alors un *survolteur*; ou la tension de S se retranchera de celle du réseau et la tension entre c et d sera inférieure à celle existant entre a et b : l'appareil sera un *dévolteur*.

Supposons que les connexions soient telles que le premier de ces deux cas soit réalisé, et faisons tourner

lentement le noyau de fer et le secondaire S qu'il porte autour de oo' ; peu à peu moins de flux traversera cette partie du circuit magnétique et la tension produite par S diminuera.

Quand on aura effectué une rotation de 90° , il n'y aura plus de flux du tout et la tension entre c et d sera la même qu'entre a et b . En continuant à faire tourner le secondaire, le flux s'inversera à travers le noyau de fer, et après un demi-tour la tension produite par S sera en sens inverse de ce qu'elle était précédemment, en sorte qu'entre c et d , nous aurons une tension moindre qu'entre a et b .

Nous serons arrivés ainsi au même résultat que si nous eussions inversé les connexions entre S et la ligne bd , avec cette différence que nous n'avons pas eu à interrompre le circuit et que la variation s'est faite progressivement. Tel est le principe des régulateurs de tension dits à « *induction* » employés sur les réseaux à courants alternatifs simples ou polyphasés pour obtenir, en un point donné, une tension toujours la même, sans à-coups dans la manœuvre.

Pratiquement, on a donné à cet appareil la forme d'un moteur asynchrone, ce qui explique pourquoi nous en indiquons ici la description. Un stator représente l'enroulement P, le rotor correspond à l'enroulement S. Comme un tel appareil tendrait à tourner, on monte sur le même arbre deux appareils identiques, dont les enroulements sont disposés de telle sorte que l'un tend à faire tourner l'arbre à droite, l'autre à gauche; comme les efforts sont égaux, mais de sens opposé, l'arbre reste immobile, et, à l'aide d'une vis sans fin engrenant sur une roue dentée, on amène les rotors à telle position que l'on veut. Le plus souvent, c'est un appareil automatique qui est chargé de ce soin sous la dépendance d'un voltmètre; on arrive ainsi à maintenir une tension constante en un point quelconque d'un réseau.

Cette application, qui tient du moteur asynchrone par sa forme et du transformateur par son rôle, montre bien la liaison qui existe entre les deux appareils.

Moteurs synchrones. — Nous avons vu (1) que lorsqu'on veut faire fonctionner en parallèle ou en quantité deux piles, il est absolument nécessaire qu'elles soient réunies par leurs pôles de *même nom* et qu'elles donnent exactement la même force électromotrice, sans quoi celle dont la tension est la plus élevée débite dans l'autre. De même, pour accoupler en parallèle deux dynamos, on s'arrange de façon qu'elles donnent une même tension, et à ce moment seulement on les réunit par les pôles de même nom.

Avec les alternateurs, qu'ils soient monophasés ou triphasés, il en va de même, mais ici le couplage est beaucoup plus délicat puisque les polarités changent constamment; telle borne, positive à un moment est négative l'instant d'après, et ainsi de suite. Le couplage s'opérera cependant d'une façon analogue en interposant entre les deux alternateurs à accoupler des *indicateurs de phase* qui signalent les moments où les couplages sont possibles, c'est-à-dire lorsque les bornes à relier sont positives ou négatives en même temps. Le moyen le plus simple pour arriver à ce résultat consiste à relier les bornes des alternateurs par des lampes ou par des voltmètres, et à ne fermer l'interrupteur reliant directement ces bornes que lorsque les lampes s'éteindront ou lorsque les voltmètres marqueront *zéro*. A cet instant, en effet, aucun courant ne passera si l'on effectue le couplage, et les alternateurs seront accrochés. Il faut pour cela que l'alternateur à coupler soit amené à une vitesse telle que les courants soient en synchronisme, c'est-à-dire

(1) *Leçons pratiques d'électricité industrielle*. Courant continu. Vol. I, p. 130.

qu'il faut que les passages à zéro des courbes de la force électromotrice coïncident très exactement. Si, d'autre part, l'excitation est telle que les valeurs maxima des forces électromotrices soient les mêmes et en opposition, aucun courant ne passera au moment du couplage. Si, au contraire, les passages à zéro étant les mêmes, les forces électromotrices s'ajoutent, il faut se garder de faire le couplage, car on mettrait les machines en tension et en court-circuit sur elles-mêmes mêmes au lieu de les mettre en parallèle. Une fois accrochés, les alternateurs resteront solidarisés à tel point que l'on pourra supprimer l'action motrice sur l'un d'eux; ce dernier continuera à tourner en constituant un *moteur synchrone*. Nous disons *moteur synchrone* par opposition au *moteur asynchrone*, lequel n'arrive jamais à être moteur au synchronisme; au contraire, l'alternateur accouplé à son voisin ou à ceux d'un réseau n'est moteur que parce qu'il reste au synchronisme; si pour une raison quelconque (surcharge par exemple) il quitte le synchronisme, il s'arrête aussitôt et ne peut reprendre ses qualités de moteur que lorsqu'on l'a amené de nouveau au synchronisme en prenant les précautions que nous avons indiquées ci-dessus.

En somme, le moteur synchrone n'est pas autre chose qu'un alternateur dont on utilise la réversibilité; il constitue un excellent appareil à vitesse rigoureusement constante, puisqu'elle est intimement liée à la fréquence du réseau, mais son emploi est peu pratique à cause des difficultés qu'il présente de lancement et de couplage. Néanmoins, il tend à être employé dans certains cas spéciaux, lorsqu'on dispose d'un personnel suffisamment au courant de sa mise en marche, parce qu'il a des propriétés très intéressantes pour le bon fonctionnement des réseaux à courants alternatifs.

Surexcitation des moteurs synchrones. — Les moteurs synchrones n'étant autres que des alternateurs, on sait que l'on peut faire varier le courant circulant dans les inducteurs en agissant sur la dynamo à courant continu constituant *l'excitatrice* de l'alternateur. Or, si l'on surexcite le moteur synchrone, c'est-à-dire si l'on augmente le courant circulant dans les inducteurs au delà de la valeur normale, le moteur continue à tourner, mais il se comporte vis-à-vis du réseau comme un condensateur en lui fournissant du courant réactif décalé *en avant*.

Cette propriété est extrêmement importante, car en choisissant le moteur synchrone et en le prenant assez puissant, on peut s'arranger de telle façon que le courant décalé en avant qu'il produit compense le courant en arrière, provenant des transformateurs des moteurs asynchrones, etc. Si ce résultat est obtenu, le réseau marche avec un facteur de puissance égal à *un* ($\cos \varphi = 1$), ce qui est excellent.

Examinons comment se produit dans le moteur synchrone surexcité ce courant décalé en avant.

Nous savons que la force contre-électromotrice d'une machine électrique quelconque est de la forme (1)

$$e = \frac{\omega \Phi n}{10^8} \text{ volt}$$

formule dans laquelle ω correspond à la vitesse, Φ au flux, n au nombre de spires, 10^8 étant le facteur par lequel il faut diviser le tout pour avoir en volts la force électromotrice.

Or, dans le cas qui nous occupe, ω la vitesse reste fixe et immuable; le moteur synchrone étant accroché sur le réseau, se trouve lié aux machines de ce réseau de la même manière que deux roues d'engrenage, qui

(1) Voir *Le courant continu*, t. I, p. 286.

sont en prises; de même n , nombre de spires, est fixe par construction, le flux Φ seul peut varier.

Supposons qu'avant de faire le couplage, le flux Φ ait été amené à une valeur telle que la force électromotrice obtenue soit juste égale à celle du réseau; la concordance des phases étant établie, effectuons le couplage; le courant absorbé sera faible puisque tout coïncide. Mais si, pour une raison quelconque, le flux vient à diminuer, en introduisant par exemple une résistance dans le circuit d'excitation, le moteur reste toujours couplé, sa vitesse liée à celle des machines du réseau ne pouvant varier, pas plus que son nombre de spires, et il faudra bien que le flux reprenne sa même valeur, si l'on veut que e se maintienne et que le couplage persiste. Comme nous avons diminué le courant de l'excitatrice, le moteur va *absorber* sur le réseau le courant magnétisant qui lui manque pour rétablir le flux à sa valeur.

Au contraire, renforçons l'excitation, c'est-à-dire augmentons le courant fourni par l'excitatrice dans les pôles inducteurs. Le flux va augmenter, la force contre-électromotrice aussi, et, pour que les choses restent en état, il va se déverser sur le réseau du courant magnétisant, c'est-à-dire que le moteur fonctionnera comme un condensateur. En fait, un ampèremètre intercalé dans le circuit d'alimentation du moteur en courant alternatif et un autre placé dans le circuit d'excitation à courant continu donneront lieu à de curieuses observations.

Dans le premier cas (faible excitation), l'ampèremètre à courant continu marque peu, l'ampèremètre alternatif beaucoup. Augmentons le courant d'excitation; à mesure que le courant continu croît, le courant alternatif *diminue*, passe par un minimum et augmente ensuite.

La courbe de cette variation (fig. 92) a la forme d'un V, et comme c'est à Mordey qu'est due cette

observation, on l'a appelée « courbe en V de Mordey ».

Remarquons en passant qu'à l'instant où le moteur synchrone absorbe sur le réseau l'intensité minima (bas de la courbe en V), le facteur de puissance est égal à un ($\cos \varphi = 1$), il n'y a aucun décalage, la puissance apparente = la puissance réelle. En pratique, il vaut toujours mieux marcher en surexcitation, de façon à compenser les mauvais facteurs de puissance qu'introduisent toujours les moteurs asynchrones et les transformateurs.

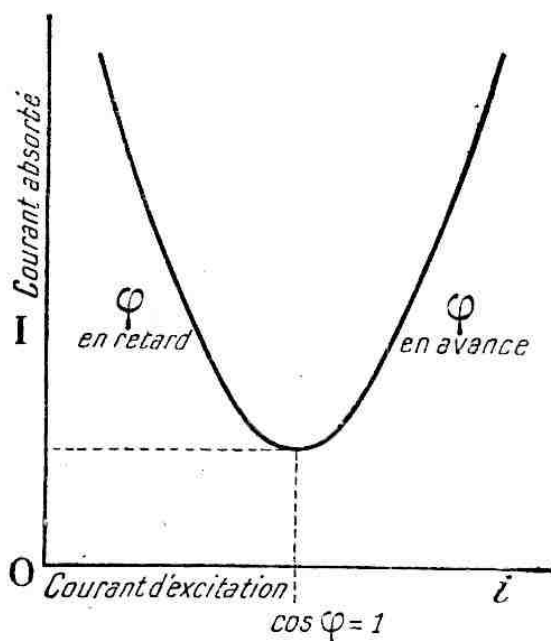


FIG. 92. — Courbe en V de Mordey obtenue avec les moteurs synchrones.

Démarrage des moteurs synchrones. — Un des plus gros inconvénients des moteurs synchrones, en plus de leur inaptitude à supporter les fortes surcharges, réside dans les difficultés de mise en marche qu'ils présentent. Ils ne démarrent pas en charge, en sorte qu'il faut avoir soin de prévoir sur la transmission une poulie folle ou un embrayage, de façon à n'avoir au départ qu'un faible couple résistant.

Pour amener un moteur synchrone à la vitesse pour laquelle il est en synchronisme avec les courants du

réseau auquel on veut le relier, on utilise le plus souvent un petit moteur asynchrone monté sur le même arbre que lui, ou, si l'on dispose de courant continu, on enverra ce courant continu dans l'excitatrice (le moteur synchrone n'étant autre qu'un alternateur, ainsi que nous l'avons montré, et devant être excité à part) et on amènera l'ensemble à une vitesse telle que les lampes de couplage ou un synchronoscope indiquent que les pôles coïncident et que l'on peut fermer l'interrupteur le reliant directement au réseau.

Certains constructeurs prévoient autour des masses polaires du système inducteur du moteur synchrone une cage d'écureuil qui permet au moteur de démarrer en appliquant le courant alternatif du réseau sur l'enroulement destiné à le recevoir. La couronne inductrice se comporte alors comme le rotor d'un moteur asynchrone grâce à la cage d'écureuil, et le système démarre en prenant une vitesse croissante. Les commutatrices, qui ne sont autres que des moteurs synchrones, puisqu'elles comportent un induit de machine à courant continu relié à des bagues destinées à recevoir le courant alternatif à transformer en courant continu (1), peuvent être démarrées de cette façon. Le seul inconvénient de ce procédé est de nécessiter un courant alternatif important et de provoquer parfois des courts-circuits dans les bobines inductrices. Ces bobines forment au moment du démarrage le secondaire d'un transformateur dont l'induit est le primaire, et, à cause de leur nombre de spires élevé, elles sont le siège d'une force électromotrice qui peut être assez considérable au point de faire sauter les isolants qui n'ont pas été prévus pour une telle surtension.

Tous ces inconvénients réunis ont empêché jusqu'ici

(1) Voir les *Installations électriques*, par A. SOULIER, p. 249.

les moteurs synchrones de se répandre, cependant leur emploi sur les réseaux à faible facteur de puissance serait très précieux, car il permettrait d'améliorer ce facteur dans de fortes proportions ainsi que le montre bien l'exemple du calcul d'une ligne que nous avons donné page 122.

Le cadre trop restreint de cet ouvrage pour un sujet aussi vaste que les courants alternatifs ne nous permettant pas de nous étendre davantage, nous bornerons là notre étude sur ces courants, cependant pour ceux de nos lecteurs qui désireraient se familiariser plus complètement avec les effets de la self-induction et de la capacité sur les courants alternatifs nous leur conseillons d'exécuter quelques-unes des expériences décrites en détail dans notre ouvrage *Manipulations d'Electricité* (Garnier frères éditeurs), ils y trouveront notamment dans le chapitre toute une série d'expériences caractéristiques faciles à réaliser en s'aidant d'appareils que l'on peut construire soi-même.

ANNEXE

Formules à retenir concernant les courants alternatifs

Intensité moyenne $I_{\text{moy}} = \frac{2}{\pi} I_{\text{max}}$, (p. 65).

Intensité efficace $I_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$, p. 64.

Facteur de puissance ou $\cos \varphi = \frac{\text{Puissance réelle}}{\text{Puissance apparente}}$
p. 114.

Fréquence $f = \frac{p \times n}{60}$, p. 74.

Force électromotrice d'induction, p. 85.

$$E_{\text{eff}} = S \times \frac{\mathcal{B}_{\text{max}}}{10\,000} \times \frac{f}{50} \times 2,2.$$

Loi d'Ohm en courant alternatif (circuit avec résistance et self-induction) $I_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$, p. 95.

Loi d'Ohm en courant alternatif (cas général, résistance, self-induction, capacité)

$$I_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \text{ p. 129.}$$

Constante de temps $\frac{L}{R}$ et $\text{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}$, p. 113.

Puissance électrique apparente $P_{\text{app}} = \sqrt{P_{\text{réelle}}^2 + P_{\text{magn}}^2}$, p. 104.

Puissance réelle = $P_{\text{app}} \cos \varphi$, p. 108.

Courants triphasés :

Montage étoile $\left\{ \begin{array}{l} \text{Tension entre fils} = \text{tension entre} \\ \text{fil et neutre} \times \sqrt{3}, \text{ p. 163.} \\ \text{Intensité dans chaque fil} = \text{inten-} \\ \text{sité de phase, p. 162.} \end{array} \right.$

Montage triangle $\left\{ \begin{array}{l} \text{Tension entre fils} = \text{tension de} \\ \text{phase p. 160.} \\ \text{Intensité dans chaque fil} = \text{inten-} \\ \text{sité de phase} \times \sqrt{3}, \text{ p. 161.} \end{array} \right.$

Puissance des courants triphasés $\left\{ \begin{array}{l} \text{Montage étoile} \\ \text{ou triangle, p. 166} \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} P = \sqrt{3} \times E_{\text{eff}} \times I_{\text{eff}} \times \cos \varphi. \end{array} \right.$

$\cos \varphi = \frac{\text{watts réels}}{\text{watts apparents}} = \frac{UI \cos \varphi}{UI}$, p. 71 et 115.

$\text{tg } \varphi = \frac{UI \sin \varphi}{UI \cos \varphi} = \frac{\text{compteur réactif}}{\text{compteur actif}}$

d'où $\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \varphi}}$, p. 115.

Correction du facteur de puissance :

Dans une installation alimentée en courant alternatif, pour passer de $\cos \varphi$ à $\cos \varphi'$, il faut fournir une puissance réactive ou magnétisante représentée par $P_{\text{réactive}} = P_{\text{active}} \times (\text{tg} \varphi - \text{tg} \varphi')$ p. 116.

ALPHABET GREC

CARACTÈRES FRANÇAIS CORRESPONDANTS	IMPRIMERIE		ÉCRITURE (Grec moderne)		APPELLATION
a	A	α	Α α	α	alpha
b	B	β, β	Β β	β	bêta
g	Γ	γ	Γ γ	γ	gamma
d	Δ	δ	Δ Δ	δ	delta
é	E	ε	Ε ε	ε	epsilonn
dz	Z	ζ	Ζ ζ	ζ	dzêta
ê	H	η	Η η	η	êta
th	Θ	θ	Θ θ	θ	thêta
i	I	ι	Ι ι	ι	iôta
k	K	κ	Κ κ	κ, κ	kappa
l	Λ	λ	Λ λ	λ	lambda
m	M	μ	Μ μ	μ	mu
n	N	ν	Ν ν	ν	nu
x (ks)	Ξ	ξ	Ξ ξ	ξ	ksi
o	O	ο	Ο ο	ο	omicronn
p	Π	π	Π π	π	pi
r, rh	P	ρ	Ρ ρ	ρ	rô
s	Σ	σ, σ	Σ σ	σ, σ	sigma
t	T	τ	Τ τ	τ	tau
u	Υ	υ	Υ υ	υ	upsilonn
ph	Φ	φ	Φ φ	φ	phi
kh, ch	X	χ	Χ χ	χ	khi
ps	Ψ	ψ	Ψ ψ	ψ, ψ	psi
ô	Ω	ω	Ω ω	ω	oméga

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE	I
-------------------	---

PREMIÈRE PARTIE NOTIONS FONDAMENTALES

CHAPITRE PREMIER

Le courant alternatif	1
Comparaison hydraulique.	2

CHAPITRE II

Self-induction	8
Inertie.	9
Self-induction et courant alternatif.	11
Différence de phase.	14
Vecteurs	16

CHAPITRE III

Capacité.	21
Capacité et courant alternatif	22
Condensateurs industriels	27

CHAPITRE IV

Capacité et self-induction.	32
Self-induction et capacité en dérivation	32
Self-induction et capacité en série.	37

CHAPITRE V

Puissance électrique d'un courant alternatif	41
1° Cas d'un courant alternatif traversant une résistance	42
2° Cas du courant alternatif traversant une self-induction.	44
Puissance active et puissance réactive.	47

CHAPITRE VI

Mesure des courants alternatifs.	51
Tracé des courbes des courants alternatifs	51
1° Méthode de Joubert	52
2° Oscillographe Blondel	55
3° Oscillographe cathodique.	57
Intensité efficace et différence de potentiel efficace.	60
Mesure de la puissance des courants alternatifs	67
Facteur de puissance ou cosinus φ	70
Mesure de la fréquence des courants alternatifs	71

DEUXIÈME PARTIE

CALCUL DES APPAREILS A COURANT ALTERNATIF

CHAPITRE PREMIER

Définition et emploi du sinus et du cosinus.	77
Mécanisme de la production des courants alternatifs.	80
Calcul de la force électromotrice induite	83
Détermination de la formule donnant la force électromotrice d'induction	85

CHAPITRE II

Calcul des bobines de self-induction.	89
Force électromotrice de self-induction.	89
Unité de self-induction	92
Résistance apparente	95
Calcul d'une bobine de réactance de lampe à arc.	97

CHAPITRE III

Facteur de puissance ou cosinus ϕ	101
Puissance absorbée par une bobine de self-induction.	101
Détermination du facteur de puissance ou cosinus ϕ .	104
Tableau des sinus, cosinus et tangentes	106
Calcul du coefficient de self-induction.	108
Constante de temps	111

CHAPITRE IV

Calcul des lignes à courants alternatifs	116
Théorème de Boucherot.	118
Exemples de calcul.	118 et 122

CHAPITRE V

Calcul des circuits avec condensateurs.	124
Circuits comportant de la self-inductance et de la capacité	127

TROISIÈME PARTIE

LES COURANTS ALTERNATIFS POLYPHASÉS

CHAPITRE PREMIER

Courants diphasés	131
Courants diphasés	133
Champ tournant.	133
Analogie mécanique	135
Montages utilisés avec les courants diphasés	137
Réduction à trois du nombre des fils.	140
Montage des moteurs	141
Inversion du sens de la marche	142
Production des courants diphasés.	142

CHAPITRE II

Courants triphasés.	146
Production des courants triphasés	146
Champs tournants produits par les courants tri- phasés	147
Propriétés des courants triphasés.	152
Montages utilisés avec les courants triphasés.	155
Propriétés des différents montages	158
Applications pratiques	163

CHAPITRE III

Puissance des courants triphasés	165
1° Cas du triangle	165
2° Cas de l'étoile.	166

CHAPITRE IV

Calcul des lignes à courants triphasés	168
Exemples de calcul.	168 et 174

CHAPITRE V

Les transformateurs	179
Transformateur de courant alternatif simple	179
Transformateurs polyphasés.	183
Rôle et emploi des transformateurs	184
Transformateurs de phases	185
Transformateur Scott.	187
Transformateur Leblanc	190
Transformateurs de mesures.	191

CHAPITRE VI

Calcul complet d'un transformateur.	192
Marche des calculs	192
Circuit magnétique.	197
Calcul des enroulements.	199
Nombre de spires.	199
Courant à vide.	202
Puissance réactive absorbée	203

CHAPITRE VII

Les moteurs à courants alternatifs.	205
Moteurs asynchrones.	205
Générateurs asynchrones.	209
Moteur asynchrone et transformateur.	210
Calcul des moteurs asynchrones	212
Régulateurs de tension	213
Moteurs synchrones	215
Surexcitation des moteurs synchrones.	217
Démarrage des moteurs synchrones.	219
 Formules à retenir concernant les courants	
alternatifs	222
Alphabet grec	224

ACHÈVÉ D'IMPRIMER SUR
LES PRESSES DES IMPRIMERIES
PAUL DUPONT A PARIS,
LE 20 JUILLET 1948.
NUMÉRO D'ÉDITION : 173.
NUMÉRO D'IMPRESSION : 2.005.
DÉPOT LÉGAL 3^e TRIM. 1948.