

**MÉTHODES ET APPAREILS DE MESURES
ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES**

Fasc. 22

Papier et Impression L. GEISLER

AUX CHATELLES

PAR RAON-L'ÉTAPE (VOSGES)

ENCYCLOPÉDIE
ÉLECTROTECHNIQUE

PAR
UN COMITÉ D'INGÉNIEURS SPÉCIALISTES

F. LOPPE, INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES
SECRÉTAIRE

MÉTHODES ET APPAREILS DE MESURES
ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES
(Troisième partie)

PAR **A. ILIOVICI**, INGÉNIEUR
CHEF DE TRAVAUX A L'ÉCOLE SUPÉRIEURE D'ÉLECTRICITÉ
ANCIEN INGÉNIEUR
DE LA SOCIÉTÉ DES PROCÉDÉS GIN POUR LA MÉTALLURGIE ÉLECTRIQUE

PARIS
LIBRAIRIE DES SCIENCES ET DE L'INDUSTRIE
L. GEISLER, IMPRIMEUR-ÉDITEUR
1, Rue Médicis, 1

1911

MÉTHODES ET APPAREILS DE MESURES

TROISIÈME PARTIE

CHAPITRE PREMIER

Mesure des Puissances

Définitions et formules. — L'énergie W , mise en jeu dans un réseau ou une partie de réseau, est une fonction du temps : $W = f(t)$. Si le rapport

$$(1) \quad P = \frac{W}{t}$$

est constant, ce rapport représente l'énergie mise en jeu pendant l'unité de temps ; c'est donc la *puissance* du réseau ou de la fraction de réseau.

Si $\frac{W}{t}$ est variable, on définit par $P = \frac{\Delta W}{\Delta t}$, la *puissance moyenne* pendant le temps Δt (ΔW étant l'énergie mise en jeu pendant ce temps), et par $p = \frac{dW}{dt}$, la *puissance instantanée* au moment t . On a

$$(2) \quad P = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} p dt.$$

Dans le cas des courants périodiques, on prend $\Delta t = T$, T étant la période du courant, et la relation (2) devient

$$(2') \quad P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt.$$

Les méthodes et appareils de mesure des puissances mesurent la quantité P définie par les formules (1) ou (2').

Soit S une portion de surface équipotentielle, de potentiel v , et $dq = i dt$, la quantité d'électricité qui traverse S pendant un temps infiniment petit dt .

L'énergie qui passe à travers la surface S pendant le temps dt est $dW = v \cdot dq = v \cdot i \cdot dt$. Cette énergie n'est pas mesurable, parce que le potentiel v n'est connu qu'à une constante près.

Mais, dans la pratique, le problème général qui se pose est le suivant : On a un réseau plus ou moins complexe (par ex. celui de la fig. 1), contenant des génératrices et des réceptrices. On considère l'ensemble des conducteurs qui transportent le courant d'une partie du réseau à une autre (par exemple les conducteurs $A_1 A_2 A_3 \dots A_n$), et on demande quelle est la puissance (ou l'énergie) que transportent ces conducteurs (ou qui passe à travers l'ensemble des sections $S_1 S_2 S_3 S_4 \dots$)

On a

$$dW = v_1 i_1 dt + v_2 i_2 dt + \dots + v_n i_n dt$$

($i_1 i_2 \dots i_n$ étant les courants dans les conducteurs) d'où l'on déduit :

$$p = v_1 i_1 + v_2 i_2 + \dots + v_n i_n.$$

Or on a toujours entre les courants i_1, i_2, \dots, i_n la relation :

$$i_1 + i_2 + i_3 \dots + i_n = 0;$$

on peut donc écrire

$$p = (v_1 - v_0) i_1 + \dots + (v_n - v_0) i_n,$$

(v_0 étant un potentiel quelconque), ou encore en appelant $u_1, u_2 \dots u_n$, les différences de potentiel $v_1 - v_0 \dots$ on a :

$$(3) \quad p = u_1 i_1 + u_2 i_2 + \dots + u_n i_n.$$

Il résulte de cette formule que : *La puissance, qui traverse les sections d'un ensemble de conducteurs d'un réseau, est égale à la somme des*

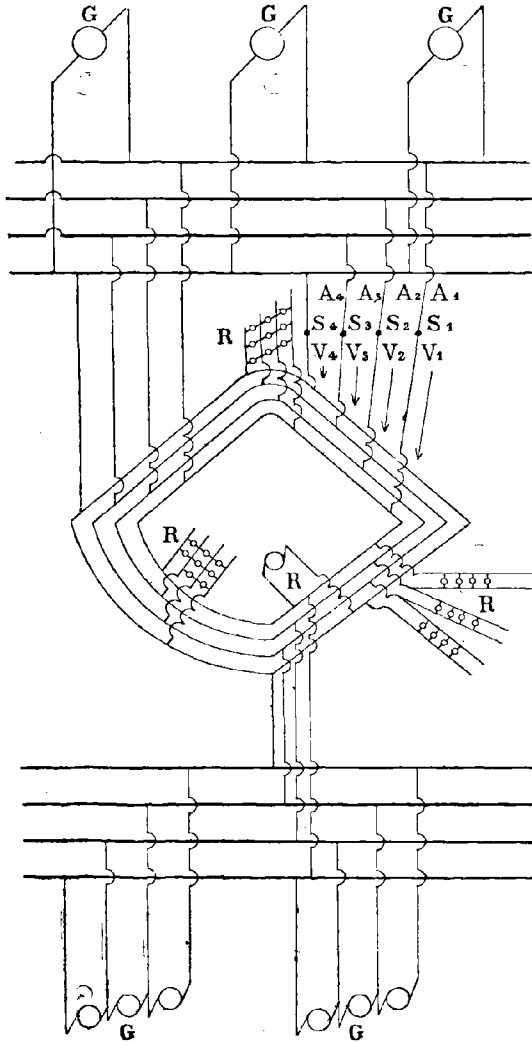


Fig. 1. — GG, génératrices ; RR, réceptrices.

produits des courants qui passent dans chacun des conducteurs, par la différence de potentiel entre chacune de ces sections et un point quelconque de l'espace.

Si, en particulier, on prend : $v_0 = v_n$, on a :

$$p = (v_1 - v_n) i_1 + \dots + (v_{n-1} - v_n) i_{n-1}$$

et en posant

$$v_1 - v_n = u_{1,n}, \quad v_2 - v_n = u_{2,n},$$

on a :

$$(3') \quad p = u_{1n} i_1 + u_{2n} i_2 + \dots + u_{n-1,n} i_{n-1}$$

d'où il résulte que *la puissance considérée est aussi égale à la somme des produits des courants, qui passent dans tous les conducteurs moins un, par la diff. de pot. entre chacune des $n - 1$ sections, qui correspondent à ces conducteurs, et la $n^{\text{ième}}$ section* (1).

Remarque. — Dans le cas du courant continu les formules (3) et (3') donnent la *puissance* demandée ; pour les courants alternatifs ou, plus généralement, périodiques, elles donnent la puissance instantanée et on en déduit la *puissance moyenne* en appliquant la formule (2').

Cas particuliers. — 1° Dans le cas d'une distribution à deux fils on applique la formule (3') et on a :

$$p = u_{1,2} \cdot i_1.$$

La puissance est égale au produit du courant dans un conducteur par la diff. de pot. entre les deux fils.

2° *Distribution à 3 fils.* — (Continu, monophasé, biphasé ou triphasé).

On a, en appliquant la formule (3) et la formule (3') :

$$(4) \quad p = u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3$$

ou

$$(4') \quad p = u_{1,3} i_1 + u_{2,3} \cdot i_2.$$

3° *Distribution à 4 fils.* — On a en appliquant la formule (3') :

$$(5) \quad p = u_{1,4} \cdot i_1 + u_{2,4} \cdot i_2 + u_{3,4} i_3.$$

(1) Ceci est la généralisation de ce qu'on appelle la méthode de deux wattmètres dans la mesure des puissances en courant triphasé à 3 fils.

Dans le cas des circuits *triphasés à 4 fils*, on a entre les diff. de pot. $u_{1,4}$, $u_{2,4}$, $u_{3,4}$, la relation :

$$(6) \quad u_{1,4} + u_{2,4} + u_{3,4} = 0$$

et la formule précédente devient :

$$(5') \quad p = u_{1,4} [i_1 - i_3] + u_{2,4} [i_2 - i_3].$$

La formule (5') n'est rigoureuse, que si les f. e. m. $u_{1,4}$, $u_{2,4}$, $u_{3,4}$, sont parfaitement triphasés.

Remarques. — 1° Dans le cas des circuits triphasés à 3 ou 4 fils, on peut mettre l'expression de la puissance (ou de l'énergie) sous d'autres formes (1), en tenant compte des relations qui existent entre les diff. de pot. et les courants. Ces formules ont donné naissance à des méthodes et à des appareils de mesure (surtout des compteurs), qu'on n'emploie

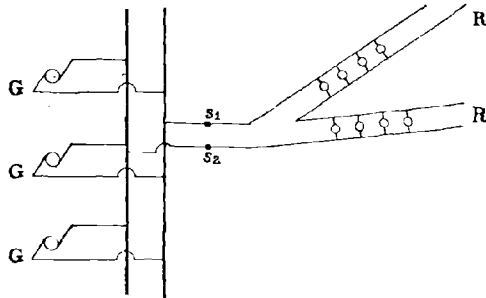


Fig. 2.

presque plus actuellement. Ceci tient surtout à ce fait, que les circuits ne sont jamais rigoureusement triphasés et en les supposant tels on risque de faire des erreurs, qui ne sont pas négligeables.

2° Si on n'a qu'un groupe de génératrices et un groupe de réceptrices (fig. 2) et qu'on mesure la puissance qui traverse un ensemble de sections s_1 et s_2 telles, que toutes les génératrices se trouvent d'un côté et toutes les réceptrices de l'autre côté par rapport à s_1 et s_2 , cette puissance

(1) Voir P. JANET. — Les compteurs à l'Exposition de 1900. (*Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, Tome I (2^e Série), Février 1901).

est celle *fournie* par les génératrices et *reçue* par les réceptrices (aux pertes dans les lignes près). Mais dans le cas, général, (par exemple dans le cas de la figure 1) on ne peut pas dire, quelle est la partie contributive de chacune des génératrices ou la partie prise par chacune des réceptrices, sur la puissance mesurée.

Unités. — L'unité pratique de puissance est le *watt*, qui vaut 10^7 ergs par seconde. La « Conférence Internationale sur les Unités et Etalons Electriques » (1908) recommande la définition suivante : « Le *watt international* est l'énergie dépensée par seconde par un courant électrique invariable d'un ampère international sous une tension électrique d'un volt international ».

On emploie souvent le *kilowatt* (1 000 watts). Le kilowatt vaut 1,360 chevaux-vapeur ou 1,02 poncelets.

MÉTHODES DE MESURES

Courant continu. — On applique d'habitude la formule (3'). On mesure, à l'aide d'ampèremètres, les courants dans $(u_n - 1)$ conducteurs, et, à l'aide de voltmètres, la différence de potentiel entre un point de

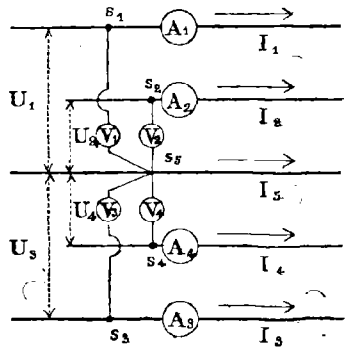


Fig. 3.

chacun de ces conducteurs et un point du $n^{\text{ème}}$ conducteur. Par exemple, dans le cas de la figure 3, qui représente une portion d'une distribution à 5 fils; la puissance qui passe par les sections s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 , est donnée par :

$$P = U_1 I_1 + U_2 I_2 + U_3 I_3 + U_4 I_4$$

U_1, U_2, \dots étant les indications des voltmètres V_1, V_2, \dots , et I_1, I_2, \dots les indicateurs des ampèremètres A_1, A_2, \dots .

Nous nous occuperons particulièrement du cas d'une distribution à deux fils. On a alors : $P = U_1 I_1$.

Supposons, pour fixer les idées, qu'il s'agit de mesurer la puissance fournie à un circuit d'utilisation AB.

Deux montages sont possibles : celui de la figure 4, a (montage amont) et celui de la figure 4, b (montage aval).

Dans le premier cas le produit UI donne la puissance fournie au circuit CAB ; on mesure donc, en trop, celle absorbée par l'ampèremètre et les fils de connexion entre A et C. Dans le deuxième cas on mesure la

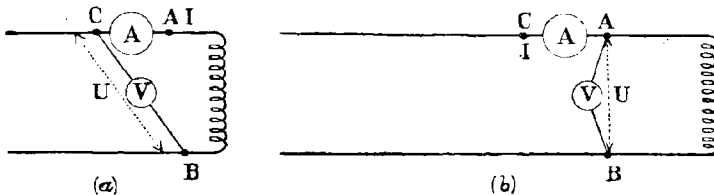


Fig. 4.

puissance totale fournie entre A et B, donc, en plus, la puissance consommée par le voltmètre.

Dans les mesures de laboratoire on adoptera de préférence le montage aval, surtout si les consommations des deux appareils sont de même ordre de grandeur et non négligeables devant la puissance à mesurer.

En effet la consommation du voltmètre, qui est de la forme $\frac{U^2}{g}$ (g étant sa résistance), est facile à calculer, g étant facilement mesurable (les fils de connexion et les contacts ont des résistances négligeables devant g). Par contre, la puissance consommée par l'ampèremètre, les fils de connexion et les contacts entre les points A et C, (puissance dont on devrait corriger les mesures dans le cas du montage amont), ne peut pas être évaluée avec assez de précision. Cette puissance est de la forme : ρI^2 , ρ étant la résistance totale comprise entre les points A et C, résistance faible et mal définie.

Dans les mesures industrielles le montage (fig. 4, a) sera souvent préférable, parce qu'on préfère ne pas faire les corrections de consommation

des appareils. Or la consommation du voltmètre est toujours à peu près égale à son maximum, tandis que celle de l'ampèremètre est proportionnelle au carré du courant, elle est donc faible pour les petites charges.

Courant alternatif. — Dans le cas des circuits à deux fils, on applique la formule (3) qui donne : $p = u \cdot i$, i étant le courant instantané et u la diff. de pot. instantanée entre les deux points entre lesquels on mesure la puissance. En général on cherche la puissance moyenne

$$(7) \quad P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt,$$

qui est mesurée à l'aide d'appareils spéciaux, les *wattmètres*, dont nous nous occuperons dans le paragraphe suivant. Nous allons indiquer deux méthodes, qu'on peut employer lorsqu'on ne dispose pas de wattmètre.

1° *Circuit non inductif.* — Lorsque le circuit d'utilisation ne contient que *des résistances non inductives* (ex. lampes à incandescence, rhéostats sans réactance) on a : $u = Ri$ et $U_{\text{eff}} = RI_{\text{eff}}$ (en désignant par U_{eff} et I_{eff} les valeurs efficaces de u et i) et la formule (7) devient :

$$P = \frac{R}{T} \int_0^T i^2 dt = RI_{\text{eff}}^2 = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}}.$$

Il en résulte que, dans ce cas, la mesure de la puissance moyenne peut se faire à l'aide d'un ampèremètre et d'un voltmètre donnant les *valeurs efficaces*. Les montages sont les mêmes qu'en courant continu, avec les mêmes restrictions. On devra se préoccuper davantage de la consommation des appareils, celle-ci étant plus grande que dans les appareils à cadre mobile, qu'on emploie le plus souvent en courant continu.

2° *Circuit inductif ou non.* — *Méthode des trois voltmètres.* — Le montage est indiqué (fig. 5). Une résistance *non inductive* R est placée en série avec le circuit d'utilisation ; trois voltmètres V , V_1 , V_2 mesurent les diff. de pot. efficaces U_{eff} , $U_{1\text{eff}}$, $U_{2\text{eff}}$, aux bornes du circuit d'uti-

lisation, aux bornes de R et aux bornes extrêmes. Si les consommations propres des appareils V et V₁ sont négligeables, on a (1) :

$$(8) \quad P = \frac{U_{2\text{eff}}^2 - U_{1\text{eff}}^2 - U_{\text{eff}}^2}{2R}$$

Si les consommations des voltmètres V et V₁, ne sont pas négligeables, on a :

$$(8') \quad P_u = \frac{U_{2\text{eff}}^2 - U_{1\text{eff}}^2 - U_{\text{eff}}^2}{2R'} - P_v,$$

P_u étant la puissance cherchée, R' = $\frac{Rg_1}{R + g_1}$ la résistance combinée de R et de la résistance g₁ du voltmètre V₁, et P_v la consommation du voltmètre V.

Remarques. — a) On doit employer des voltmètres donnant les valeurs

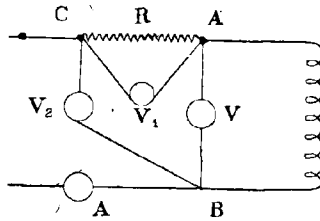


Fig. 5.

efficaces et ayant leur coef. de self. négligeables : *electromètres, voltmètres thermiques* ou *électrodynamomètres* (2).

(1) Démonstration des formules (8) et (8') : on a $P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt$. Or, le courant i passe aussi dans R, donc $i = \frac{u_1}{R}$ d'où $P = \frac{1}{RT} \int_0^T u u_1 dt = \frac{1}{2RT} \int_0^T (u_2^2 - u_1^2 - u^2) dt$ (en remarquant que $u_2 = u + u_1$ d'où $u_2^2 = u^2 + u_1^2 + 2uu_1$) ou encore

$$P = \frac{1}{2R} \left[\frac{1}{T} \int_0^T u_2^2 dt - \frac{1}{T} \int_0^T u_1^2 dt - \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt \right]$$

d'où (8). Si les voltmètres consomment, le même courant traverse le circuit d'utilisation combiné avec le voltmètre V₁, et la résistance R combinée avec le voltmètre V. On peut donc appliquer (8) à condition qu'on remplace R par R' et qu'on prenne pour P la puissance P_u augmentée de P_v consommée dans le voltmètre V₁.

(2) Le coef. de self. des électrodynamomètres n'est pas toujours négligeable.

b) Si on cherche les conditions pour avoir la plus petite erreur relative $\frac{dP}{P}$, on trouve, que la résistance R doit être choisie de façon à avoir $U_{\text{eff}} = U_{i,\text{eff}}$. La source utilisée doit donc fournir à peu près le voltage double de celui du circuit d'utilisation. Dans ces conditions, si les voltmètres sont de même qualité et si on s'arrange de façon à être dans les meilleures conditions de lecture pour chacun d'entre eux, on a, pour l'erreur relative sur la puissance

$$\frac{dP}{P} = \frac{dR}{R} + 2 \left(1 + \frac{2}{\cos \varphi} \right) \frac{dU_{\text{eff}}}{U_{\text{eff}}},$$

dans le cas du circuit inductif, et

$$\frac{dP}{P} = \frac{dR}{R} + 6 \frac{dU_{\text{eff}}}{U_{\text{eff}}},$$

pour les circuits non inductifs.

c) La méthode est peu commode et très peu précise : parce qu'elle demande trois appareils et trois lectures, parce que la source doit fournir un voltage double de celui du circuit d'utilisation, et parce que l'erreur relative sur P est grande. Cette erreur croît lorsque $\cos \varphi$ diminue.

Dans le cas des circuits à plusieurs fils, monophasés ou polyphasés, on emploie surtout les wattmètres, dont nous indiquerons les montages dans le paragraphe suivant.

WATTMÈTRES (1)

Les *wattmètres* sont des appareils, qui servent à la mesure des puissances.

Les wattmètres peuvent être divisés en quatre groupes :

1° Les *wattmètres électrodynamiques*, qui sont des électrodynamomètres, dont la bobine fixe est parcourue par le courant du circuit d'utilisation et dont la bobine mobile, en série avec une résistance appropriée, a ses bornes à la diff. de pot. de ce circuit. Ce sont les

(1) Voir aussi fascicule 10.

appareils les plus répandus et parmi lesquels se trouvent les wattmètres les plus précis.

2° *Wattmètres d'induction*, qui dérivent des compteurs d'induction, dont nous parlerons dans le Chapitre III. Ces appareils se répandent beaucoup comme appareils de tableau ; ils sont robustes et peu sensibles aux influences des champs extérieurs.

3° *Wattmètres thermiques*, qui dérivent des voltmètres du même système.

4° *Wattmètres électrostatiques* qui dérivent des électromètres.

Nous nous occuperons particulièrement des wattmètres électrodynamiques et d'inductions.

Wattmètres électrodynamiques. Principe. — Nous avons vu fascicule 24, page 90, que la formule générale des électrodynamomètres peut se mettre sous la forme

$$(9) \quad \alpha = k i i' + k_1 i',$$

(en posant $k = \frac{1}{C} \cdot \frac{dM}{d\alpha}$ et $k_1 = \frac{1}{C} \cdot \frac{d\Phi}{d\alpha}$, et i et i' étant des courants constants).

Si i et i' sont des courants alternatifs de même fréquence et si leur période est très faible par rapport à celle de l'équipage mobile de l'appareil, celui-ci déviara d'un angle α donné par la formule :

$$\alpha = \text{valeur moyenne de } (k i i') + \text{valeur moyenne de } (k_1 i').$$

On s'arrange, comme nous le verrons, pour avoir k et k_1 ⁽¹⁾ constants. Dans ce cas on a :

$$(10) \quad \alpha = k \frac{1}{T} \int_0^T i i' dt \text{ } ^{(2)}.$$

(1) La quantité k_1 dépend de l'action des champs extérieurs. Ces champs sont : le champ magnétique terrestre et ceux provenant des courants qui parcourent les conducteurs voisins. Les actions sur le wattmètre des champs créés par les conducteurs voisins peuvent être rendues très faibles par un montage convenable de l'appareil ; quant au champ terrestre, il est constant et donne une valeur constante à k_1 .

(2) Le deuxième terme donne $k \int_0^T i' dt$, qui est nul dans le cas des courants alternatifs.

Si on fait passer dans la bobine fixe un courant continu i , et si on établit aux bornes du circuit de la bobine mobile, de résistance totale g (fig. 6), une différence de pot. continue u , on a : $i' = \frac{u}{g}$, et la formule (9) devient :

$$\alpha = \frac{k}{g} ui + k_1 i'.$$

Or, ui est une *puissance*, que nous appellerons P . On a donc :

$$(11) \quad \alpha = \frac{k}{g} \cdot P + k_1 i.$$

Cette formule nous indique que, en courant continu, la déviation de l'appareil dépend d'une puissance.

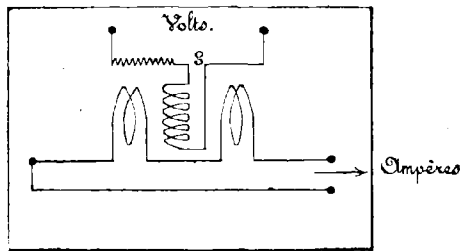


Fig. 6.

Si le courant i et la différence de pot. u sont alternatives et si on suppose négligeable la réactance et la capacitance du circuit de la bobine à fil fin, on a encore : $i' = \frac{u}{g}$, et la formule (10) donne :

$$\alpha = \frac{k}{g} \frac{1}{T} \int_0^T uidt$$

ou

$$(12) \quad \alpha = \frac{k}{g} \cdot P,$$

en remarquant que $\frac{1}{T} \int_0^T uidt$ représente une *puissance moyenne*, que nous appellerons P ⁽¹⁾.

(1) Nous verrons, dans chaque cas particulier, de quelle puissance il s'agit.

Les *wattmètres électrodynamiques* sont employés surtout en courant alternatif. On les étalonne en courant continu. Des formules (11) et (12) il résulte, qu'un appareil étalonné en courant continu mesurera, en courant alternatif, une puissance moyenne, si, dans la première opération, on a éliminé l'influence du champ terrestre. Pour cela il suffit ⁽¹⁾ de faire passer d'abord les courants dans les deux bobines dans un sens approprié et ensuite, inverser ces courants. La déviation en courant alternatif sera la moyenne des déviations obtenues dans les deux mesures.

Montage des wattmètres. — Circuit à deux fils. — Soit AB le circuit dont on veut mesurer la puissance (moteur, lampes, etc). On montera le

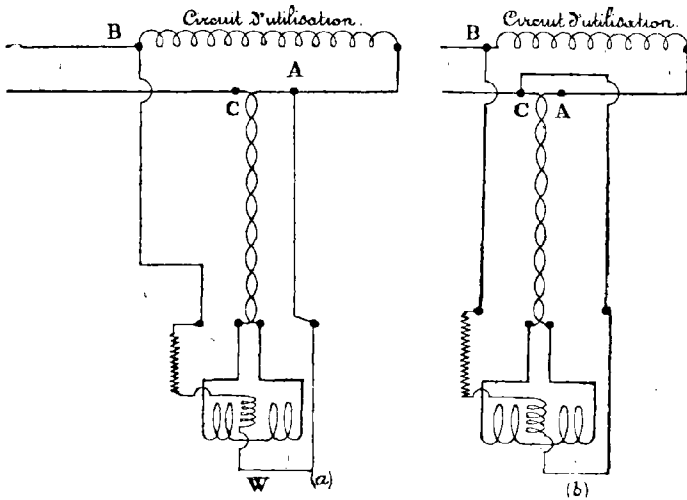


Fig. 7.

gros fil du wattmètre en série avec ce circuit, et le fil fin, en série avec une résistance appropriée (qui peut être intérieure ou extérieure à l'appareil), aux bornes de ce circuit : l'une des extrémités du circuit à fil fin sera en B, l'autre en A (fig. 7, a, montage aval) ou en C (fig. 7, b, montage amont). Dans le premier cas, le wattmètre mesure, en trop, la puissance consommée dans son fil fin, dans le second cas, celle consommée

(1) Voir aussi fascicule 21, page 91.

dans la bobine à gros fil et dans les connexions et les contacts compris entre A et C. Pour le choix du montage, voir page 7.

Remarque. — La différence de potentiel entre les divers points des deux bobines ne doit pas dépasser une certaine limite, sous peine d'abîmer

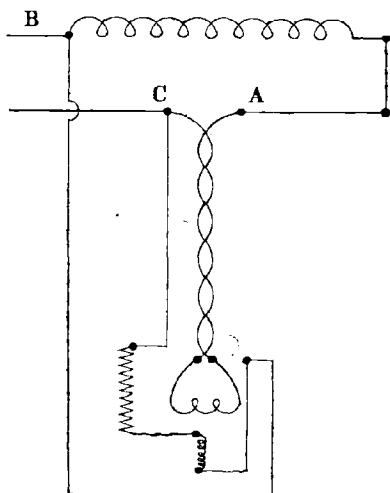


Fig. 8. — Mauvais montage parce que, entre les deux bobines du wattmètre, on a toute la tension du circuit.

leur isolant. C'est pourquoi, on fera les montages (fig. 7) et on évitera celui indiqué (fig. 8), surtout dans les circuits à tension élevée.

Circuits à plusieurs fils (monophasés ou polyphasés). — L'expression générale de la puissance instantanée, dans les circuits à plusieurs fils, est une somme de plusieurs termes de forme $u \cdot i$. Pour la mesure de la puissance moyenne on emploiera, en général, autant de wattmètres qu'il y a de termes dans la somme, la bobine fixe de chaque wattmètre étant parcourue par le courant i , et le fil fin ayant à ses bornes la tension u . Dans certains cas, on introduit dans l'expression de la puissance des différences de courants et on emploie alors des wattmètres spéciaux, (voir par exemple page 5).

Circuits monophasés à deux ponts. — De la formule (4'), page 4, il résulte le montage de la figure 9. On monte d'habitude les deux watt-

mètres sur les fils extrêmes ; ils sont alors parcourus par des courants de même ordre de grandeur et doivent donc être de même calibre.

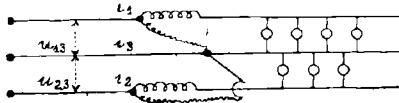


Fig. 9.

Circuits diphasés. — Si les deux phases sont séparées, on mesure la puissance dans chacune d'elles, comme pour les circuits monophasés à deux fils, et on ajoute les résultats. Si les phases ont un fil commun, on emploie le montage de la figure 9. Dans les deux cas, si les phases sont également chargées, il suffit de mesurer la puissance de l'une et de multiplier le résultat par deux.

Circuits triphasés à 3 fils. — Dans les circuits triphasés, les génératrices et les réceptrices sont montées — ou ont leurs phases montées —

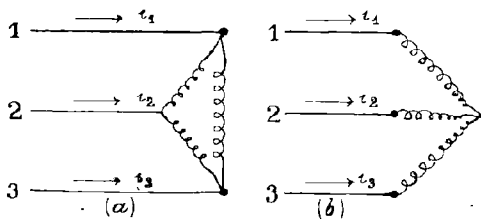


Fig. 10.

habituellement suivant la figure 10, a (*montage en triangle*) ou suivant la figure 10, b (*montage en étoile*). Dans les ouvrages sur les « Mesures »

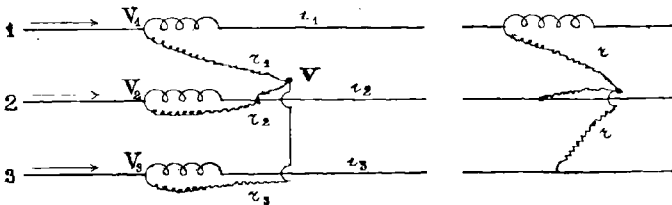


Fig. 11.

Fig. 11 bis.

on considère séparément chacun de ces montages. En réalité les circuits peuvent être montés de manières différentes de ce qu'indique la figure

10 ; dans tous les cas on aura trois conducteurs 1, 2, 3, (fig. 10, 11, 11 bis, 12) parcourus par trois courants i_1, i_2, i_3 . Les méthodes, que nous indiquerons, sont générales et s'appliquent quels que soient les montages des génératrices ou des réceptrices (1). De la formule (4) résulte le montage de la figure 11, dans lequel on emploie trois wattmètres, dont les bobines fixes sont en série sur les trois conducteurs 1, 2, 3 et les fils fins ont l'une de leurs extrémités connectée sur ces conducteurs, les trois extrémités restées libres étant réunies ensemble. Les résistances r_1, r_2, r_3 des circuits à fil fin, ne sont pas nécessairement égales, le poten-

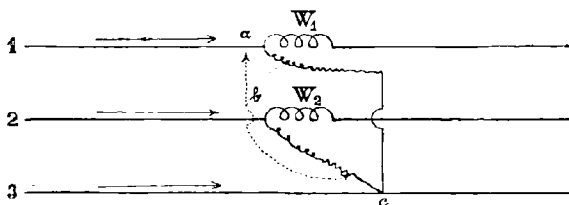


Fig. 12

tiel v_0 pouvant être quelconque. Dans la pratique on prend le plus souvent $r_1 = r_2 = r_3$; dans ce cas le point v_0 s'appelle point *neutre artificiel*. Les différences de potentiel $v_1 - v_0, v_2 - v_0, v_3 - v_0$, peuvent alors être représentées par trois vecteurs égaux et décalés de 120° l'un par rapport à l'autre : elles forment un système de différences de potentiel triphasé (2).

Si les phases sont équilibrées et si on a $r_1 = r_2 = r_3$, les wattmètres donnent des indications égales ; on peut se servir dans ce cas, d'un seul wattmètre monté d'après la figure 11 bis.

Méthode des deux wattmètres. — De la formule (4') il résulte qu'on peut mesurer la puissance à l'aide de deux wattmètres, montés comme l'indique la figure 12 : les bobines fixes sur deux des conducteurs 1, 2, 3,

(1) Si on peut séparer les trois phases on mesure la puissance dans chacune d'elles comme en circuit monophasé. Si le circuit est équilibré il suffit de mesurer la puissance de l'une d'elles et multiplier le résultat par trois.

(2) Le potentiel v_0 du point neutre a pour valeur la moyenne des 3 potentiels v_1, v_2, v_3 . On a en effet ; $u_1 + u_2 + u_3 = (v_1 - v_0) + (v_2 - v_0) + (v_3 - v_0) = 0$, d'où $v_0 = \frac{v_1 + v_2 + v_3}{3}$.

(par exemple sur 1 et 2) et chacune des bobines mobiles, entre la bobine fixe correspondante et le troisième fil de la ligne. Nous avons déjà vu, que cette méthode s'applique pour n'importe quelle distribution à trois fils. Mais il y a certaines précautions à prendre. Pour fixer les idées, supposons les f. e. m. et les courants sinusoïdaux. Les différences de potentiel $u_1 = v_1 - v_0$, $u_2 = v_2 - v_0$ et $u_3 = v_3 - v_0$ peuvent être représentées par les vecteurs OA, OB et OC (fig. 13). Or, on a $u_{1,3} = v_1 - v_3 = v_1 - v_0 - (v_3 - v_0) = u_1 - u_3$, de même $u_{2,3} = u_2 - u_3$; les différences de

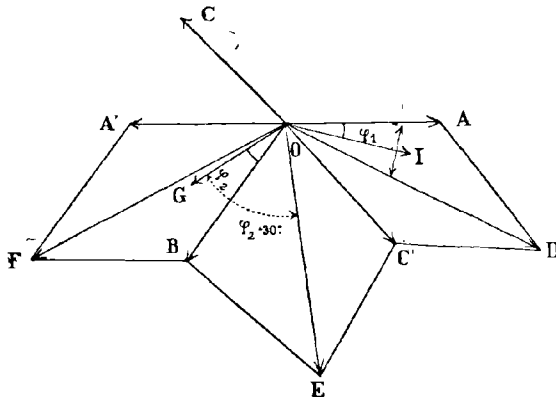


Fig. 13.

potentiel $u_{1,3}$ et $u_{2,3}$ seront donc représentées par les vecteurs OD et OE. Supposons que les courants i_1 et i_2 soient décalés en arrière par rapport à u_1 et à u_2 de φ_1 et φ_2 ; on pourra les représenter, à une échelle convenablement choisie, par les vecteurs OI et OG.

Les puissances indiquées par les deux wattmètres seront respectivement :

$$P_1 = \frac{1}{T} \int u_{1,3} \cdot i_1 dt = U_{1,3} \cdot I_1 \cdot \cos (30^\circ - \varphi_1)$$

et

$$P_2 = \frac{1}{T} \int u_{2,3} \cdot i_2 dt = U_{2,3} \cdot I_2 \cdot \cos (30^\circ + \varphi_2)$$

$U_{1,3}$, $U_{2,3}$, I_1 , I_2 étant les valeurs efficaces de $u_{1,3}$, $u_{2,3}$, i_1 , i_2 .

Ces deux puissances sont positives, tant que $30^\circ + \varphi_2 < 90^\circ$, c'est-à-dire pour $\varphi_2 < 60^\circ$. Pour $\varphi_2 = 60^\circ$ le deuxième wattmètre indiquera une

puissance nulle ; pour $\varphi_2 > 60^\circ$, il indiquera une puissance négative, et on devra *retrancher la puissance qu'il mesure de celle mesurée par le premier wattmètre* (1).

Pour savoir dans quel cas on se trouve, le moyen le plus simple — si on n'a pas d'autres indications — consiste à détacher du point *c* (fig. 12) le fil fin du wattmètre qui indique une puissance moindre (supposons que ce soit W_2) et à le connecter provisoirement en *a*. On voit sur le diagramme (fig. 13), que tant que $\varphi_2 < 60^\circ$ le wattmètre dévie *dans le même sens* lorsque le fil fin est relié en *c* ou en *a* ; il dévie dans *deux sens contraires* si $\varphi > 60^\circ$.

Autre remarque. — Dans le wattmètre W_2 le décalage entre le courant dans la bobine fixe et la différence de potentiel aux bornes de la bobine mobile est de $\varphi_2 + 30^\circ$; ce décalage sera, en général, grand. Or nous verrons page 23, qu'un wattmètre donne des indications d'autant plus fausses que ce décalage est plus grand. Ceci semble être un inconvénient de la méthode. En réalité, dans les wattmètres actuels l'erreur dont nous

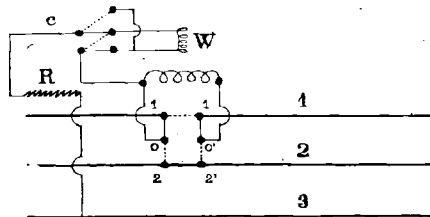


Fig. 14.

parlons est faible ; d'autre part lorsque $\varphi_2 + 30^\circ$ devient important $\cos(\varphi_2 + 30^\circ)$ tend vers zéro et le wattmètre W_2 n'indique qu'une faible partie de la puissance totale, donc, même si l'erreur sur W_2 devenait importante, l'erreur sur la puissance à mesurer $P_1 + P_2$ resterait faible.

Si la puissance à mesurer est suffisamment constante, on peut faire la mesure avec un seul wattmètre (fig. 14), dont le gros fil est introduit successivement dans les circuits 1 ou 2.

Dans la figure 14 le wattmètre se trouve dans le circuit 1, pendant

(1) Si φ_1 était un décalage en avant (décalage produit par exemple par des condensateurs) ce serait le premier wattmètre qui donnerait une puissance négative, pour $\varphi_1 > 60^\circ$.

qu'une barrette métallique ferme le circuit 2. Le commutateur *c* sert à intervertir les connections du fil fin dans le cas où l'appareil ne dévie pas dans le bon sens. Pour ne pas couper le circuit pendant le passage du wattmètre d'un conducteur sur l'autre, la barrette métallique doit prendre la place de la bobine fixe avant que celle-ci soit enlevée, et la deuxième barrette ne doit être retirée du circuit qu'après qu'on y a introduit le wattmètre.

Certaines maisons construisent des commutateurs spéciaux pour ce montage.

Circuit triphasé à 4 fils. — D'après la formule (5) on peut employer trois wattmètres. On monte leurs bobines « ampères » dans les 3 fils de

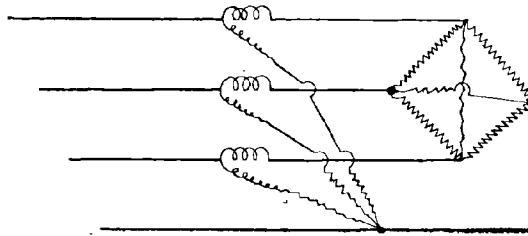


Fig. 15.

ligne et les bobines « volts » entre chacun de ces conducteurs et le fil neutre (fig. 15). Cette méthode s'applique pour tous les circuits à 4 fils, triphasés ou non.

Dans le cas des circuits triphasés équilibrés on peut employer un seul wattmètre dont on multipliera l'indication par *trois*.

Dans le cas des circuits triphasés non équilibrés, mais dans lesquels les différences de potentiel $u_{1,4}$, $u_{2,4}$, $u_{3,4}$ sont *rigoureusement triphasées*, on peut employer deux wattmètres montés d'une façon spéciale (fig. 16).

On a en effet d'après (5') :

$$p = u_{1,4} (i_1 - i_3) + u_{2,4} (i_2 - i_3).$$

Il en résulte qu'on peut employer deux wattmètres contenant chacun deux bobines à gros fil montées comme l'indique la figure 16.

Cette méthode n'est pas toujours assez exacte, les différences de potentiel n'étant pas toujours suffisamment triphasées.

On a aussi appliqué pour le circuit à 3 fils (surtout pour les compteurs, qui se montent, comme nous le verrons, de la même façon que les wattmètres) d'autres méthodes, dans lesquelles on tient compte des relations de grandeurs et des décalages qui existent entre les différences

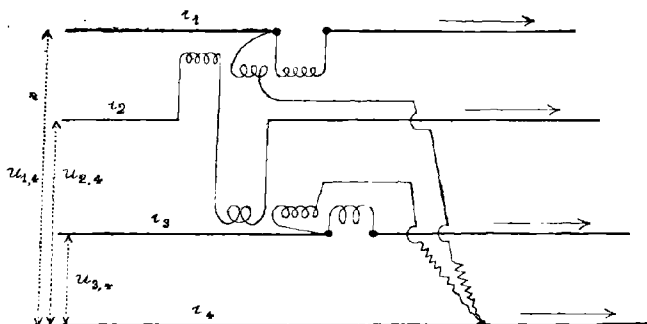


Fig. 16.

de potentiel triphasées. La plupart de ces méthodes sont abandonnées aujourd'hui, et on emploie constamment la méthode des deux wattmètres ⁽¹⁾.

Emploi des transformateurs. — Nous verrons, Chapitre VII, dans quels cas on emploie les transformateurs (circuits à haute tension, ou à

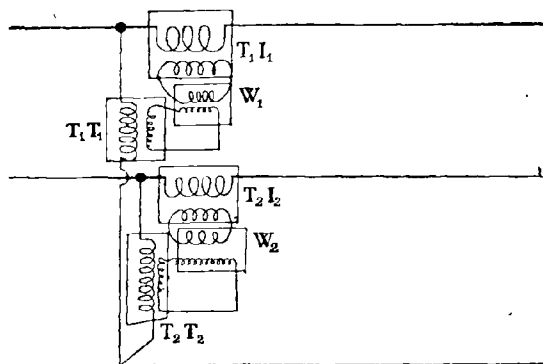


Fig. 17 — T_1I_1 et T_2I_2 transformateurs d'intensité;
 T_1T_1 et T_2T_2 transformateurs de tension; W_1W_2 wattmètres.

forte intensité). Le montage du wattmètre à transformateurs se déduit facilement des précédents. Nous indiquons (fig. 17), à titre d'exemple,

(1) Voir page 5, note.

l'application de la méthode des deux wattmètres avec appareils à transformateur d'intensité et de tension.

CAUSES D'ERREUR DANS LES WATTMÈTRES.

I. — En courant continu les erreurs peuvent être dues :

1° *A la puissance dépensée dans le gros fil ou dans le fil fin*, suivant le montage adopté : ces consommations sont faibles dans les appareils actuels et on n'a à en tenir compte que dans les mesures de précision. Dans certains wattmètres Weston, l'erreur due à la consommation du fil fin est corrigée automatiquement à l'aide d'un circuit compensateur (voir page 29).

2° *A la variation de la résistance du circuit de la bobine mobile*, variation due à son échauffement par le passage du courant ou à la température extérieure. Nous avons vu fascicule 21, page 9, comment on réduit cette cause d'erreur.

3° *A l'influence du champ magnétique terrestre et de celui créé par les aimants et les courants voisins*. Ces influences sont sensibles, parce que le champ créé par la bobine mobile est faible (inférieur à 100 gauss). On a vu page 13 qu'on peut éliminer l'influence du champ terrestre en faisant deux mesures, avec les courants de sens contraires. L'influence des courants voisins peut être réduite en plaçant l'appareil assez loin des conducteurs parcourus par de forts courants et en amenant le courant à la bobine fixe à l'aide de conducteurs très voisins et même torsadés (voir fig. 7).

Ces précautions sont faciles à prendre, parce qu'en courant continu les wattmètres ne s'emploient que dans les laboratoires.

II. — En courant alternatif, les causes d'erreur 1° et 2° subsistent.

Le champ terrestre, les aimants permanents et les courants continus n'ont aucune influence ; mais l'appareil peut être influencé par les conducteurs parcourus par des courants alternatifs. Pour réduire leur action on doit prendre les mêmes précautions que dans le cas des courants continus. Ces précautions sont difficiles à prendre, lorsque l'appareil

se trouve sur un tableau, où on ne dispose pas toujours d'assez de place pour éloigner les appareils les uns des autres ou des conducteurs.

La place de l'appareil est bien choisie si, pour chaque position de l'aiguille, le passage ou l'interruption du courant dans un circuit voisin quelconque — excepté le sien — ne change pas la déviation.

Pour savoir si l'appareil n'est pas influencé par son propre circuit, il suffit de faire, pour chaque valeur de la puissance, deux mesures avec volts et ampères de sens contraires : les indications doivent rester les mêmes.

Causes d'erreurs propres au courant alternatif :

1° *Influence de la self-induction et de la capacité du circuit à fil fin.*
Nous avons vu page 13, qu'un wattmètre étalonné en courant continu est exact en courant alternatif, à condition que la réactance et la capacité du fil fin soient négligeables devant sa résistance g . Pour voir ce qui se passe lorsque ces quantités ne sont pas négligeables, reprenons la formule de l'électrodynamomètre

$$(10) \quad \alpha = k \frac{1}{T} \int_0^T i i' dt,$$

et supposons, pour simplifier, que les tensions et les courants soient sinusoidaux et que le fil fin ne présente que de la self-induction. Supposons toujours, que i soit le courant principal et i' le courant dans la bobine mobile, produit par la différence de potentiel u aux bornes du circuit d'utilisation. On a, si φ est le décalage de i sur u , et Ψ le décalage, en arrière, de i' sur u :

$$\begin{aligned} u &= U \sqrt{2} \cdot \sin \omega t \\ i &= I \sqrt{2} \sin (\omega t - \varphi) \\ i' &= I' \sqrt{2} \sin (\omega t - \Psi) \end{aligned}$$

U, I et I' étant les valeurs efficaces, de $u, i,$ et i' ; d'autre part $I' = \frac{U}{g} \cdot \cos \Psi$ avec $\tan \Psi = \frac{l\omega}{g}$, l étant le coefficient de self-induction du fil fin.

En remplaçant dans (10) on obtient :

$$\alpha = \frac{k}{g} UI \cos \Psi \cdot \cos (\varphi - \Psi).$$

Or, si on appelle P' la puissance en courant continu qui correspond à la déviation α , puissance qui est indiquée par l'appareil, on a, après correction de l'influence des champs extérieurs : $\alpha = \frac{k}{g} \cdot P'$, en tenant compte de la relation (12).

L'appareil indiquera donc une puissance $P' = UI \cos \Psi \cos (\varphi - \Psi)$, tandis que la puissance réelle qui correspond à U, I et φ est :

$$P = UI \cos \varphi.$$

On en déduit $P = AP'$, en posant

$$(13) \quad A = \frac{\cos \varphi}{\cos \Psi \cdot \cos (\varphi - \Psi)}.$$

Le facteur correctif A peut être mis sous la forme :

$$A = \frac{1}{\cos^2 \Psi [1 + \tan \varphi \cdot \tan \Psi]}$$

Dans les wattmètres actuels : $\cos^2 \Psi \approx 1$ ⁽¹⁾, donc

$$A = \frac{1}{1 + \tan \varphi \cdot \tan \Psi} = 1 - \tan \varphi \cdot \tan \Psi + \tan^2 \varphi \tan^2 \Psi \dots$$

Pratiquement il suffit de prendre ⁽²⁾ :

$$(14) \quad A = 1 - \tan \varphi \cdot \tan \Psi.$$

On n'a à se préoccuper de la correction que dans les mesures de laboratoire.

Remarquons que A dépend du décalage φ . Comme il s'agit d'une correction, il suffit d'avoir une valeur approximative de φ , qu'on

(1) Pour un wattmètre, dont le fil fin a une résistance $g = 4\,000 \, \Omega$ (appareil courant pour 120 volts) et un coefficient de self-induction $l = 0,009$ henry, on aura, pour une fréquence 50 \approx : $\frac{1}{\cos^2 \Psi} = 1,000001$.

(2) Pour l'appareil précédent et pour $\cos \varphi = 0,55$ on aurait :

$$\tan \varphi \tan \Psi \approx 0,001$$

et

$$\tan^2 \varphi \cdot \tan^2 \Psi \approx 0,000001.$$

pourrait obtenir à l'aide d'un phasemètre ou par la formule : $\cos \varphi = \frac{P'}{UI}$.

U et I seront mesurés à l'aide d'un voltmètre et d'un ampèremètre.

Il résulte de la formule (14) que, si $\Psi = 0$, on a $A = 1$ pour $\varphi = \Psi$, $A > 1$ pour $\varphi < \Psi$ et $A < 1$ pour $\varphi > \Psi$. L'appareil retardera donc pour $\varphi < \Psi$ et il avancera $\varphi > \Psi$. Dans *la pratique* le facteur A ne diffère sensiblement de l'unité que pour φ voisin de 90° , et *l'appareil avance*.

On peut retrouver les mêmes résultats par le diagramme (fig. 18).

Pour un courant donné I, P' est proportionnel à la longueur \overline{OC} , et P à

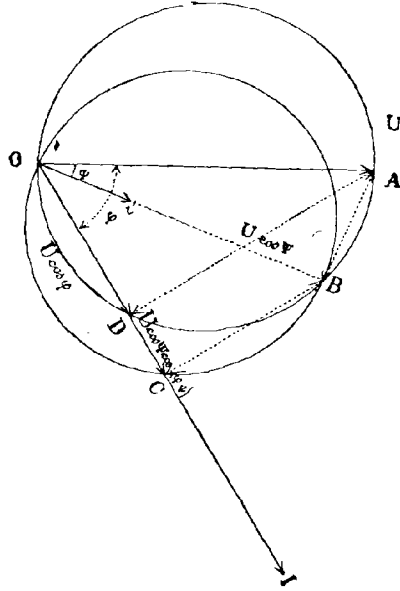


Fig. 18.

\overline{OD} , et on a : $\overline{OD} < \overline{OC}$ pour $\varphi > \Psi$, $\overline{OD} = \overline{OC}$ pour $\varphi = \Psi$, et $\overline{OD} > \overline{OC}$ pour $\varphi < \Psi$.

Ce que nous disons plus haut reste vrai, si le fil fin contient aussi de la capacité ; dans ce cas, Ψ sera négatif, si l'effet de la capacité prédomine.

Si la tension et le courant ne sont pas sinusoïdaux, le facteur de correction A prend une forme compliquée, mais, dans les cas habituels sa

valeur diffère de celle donnée par (14) d'une quantité tout à fait négligeable.

L'indication d'un wattmètre électrodynamique est donc (même dans les cas considérés dans les laboratoires) indépendante de la forme des courants.

2° *Influence de l'induction mutuelle entre les deux bobines.* — Cette influence est tout à fait négligeable.

3° *Influence des courants induits dans les pièces métalliques voisines des bobines.* — Cette influence peut être importante.

De ce qui précède il résulte que, dans la construction d'un wattmètre, on évitera l'emploi de masses métalliques importantes, ou on les placera de façon que leur influence soit négligeable. On donnera au fil fin et aux résistances additionnelles une capacité et un coefficient de self-induction aussi faibles que possible.

Dans l'emploi de l'appareil, on se préoccupera de l'influence des masses métalliques extérieures et des conducteurs parcourus par de forts courants. Dans les mesures de précision, on tiendra compte du facteur de correction A, de la consommation du fil fin ou du gros fil, des contacts et des fils de connexion.

Avantages et inconvénients des wattmètres électrodynamiques. — Les inconvénients de ces appareils résultent de ce qu'on vient de dire sur les causes d'erreur (voir aussi page 91, fascicule 21).

Constructeur	Bobine fixe		Bobine mobile					
	A. t.	Consom. en Watts	Poids total (gr.)	Couple (ergs)	Nombre de spires	Courant maximum	Résist.	Coefficient de self
						ampères	(ohms)	(henrys)
Carpentier.	600 env.	10 env.	5 env.	100 env.	300 env.	0,02	60	0,001 env.
id.	300 »	6 »	5 »	100 »	300 »	0,02	60	0,001 »
Weston.	240 »	4 »	3,5 »	250 »	280 »	0,05	45	0,003 »
id.	200 »	2 »	2 »	490 »	210 »	0,05	35	0,002 »
Siemens et Halskø.	400 »	6 »	9 »	685 »	400 »	0,033	100	0,0088 »
id.	400 »	4 »	3 »	390 »	300 »	0,033	100	0,005 »
Hartmann et Brau.	400 »	4 »	4,5 »	370 »	400 »	0,033	100	0,008 »
								0,005 »

Les avantages sont :

- 1° Indépendance de la fréquence et de la forme des courants.
- 2° Ces appareils sont constants dans leurs indications : c'est parmi eux qu'on trouve les wattmètres de précision.

L'amortissement est en général à air ; l'aiguille s'arrête au bout de 3 à 5 oscillations simples d'une durée totale de 2 à 3 secondes.

L'approximation, dans les bons appareils, est de l'ordre de 0,5 %.

Le tableau précédent contient quelques valeurs numériques intéressantes.

DESCRIPTION DE QUELQUES APPAREILS

Wattmètre Carpentier (fig. 19). — C'est un wattmètre de précision qui présente des particularités très intéressantes. La graduation est proportionnelle : on obtient ce résultat, comme dans plusieurs autres types de wattmètres, par l'emploi de bobines fixes rectangulaires, dont les côtés parallèles à l'axe de la bobine mobile sont plus rapprochés du centre que les côtés perpendiculaires à cet axe.

La bobine à fil fin consomme un courant faible (0,02 ampère ou 0,04 ampère) ; son coefficient de self-induction et sa capacité sont négligeables, l'appareil est donc exact même pour les circuits fortement inductifs.

Ce qu'il y a de plus intéressant dans cet appareil, c'est que la bobine de champ (bobine parcourue par le courant principal) est amovible. On dispose d'un certain nombre de bobines enfermées dans des blocs bien ajustés. L'appareil proprement dit contient la bobine à fil fin et les résistances additionnelles. Il présente une cavité, dans laquelle on peut introduire les blocs contenant les bobines fixes. Des précautions sont prises, pour que les bobines occupent toutes la même place.

On a ainsi un wattmètre à plusieurs sensibilités, pour les ampères (1) et pour les volts.

(1) Il est très intéressant dans les Laboratoires d'avoir un appareil à plusieurs sensibilités pour les volts et pour les ampères. Pour les volts le problème a été résolu par tous les constructeurs, par l'addition de résistances en série avec le fil fin. Pour les ampères

On le construit normalement pour les sensibilités 1, 3, 10, 30, 100 et 300 ampères et jusqu'à 600 volts.

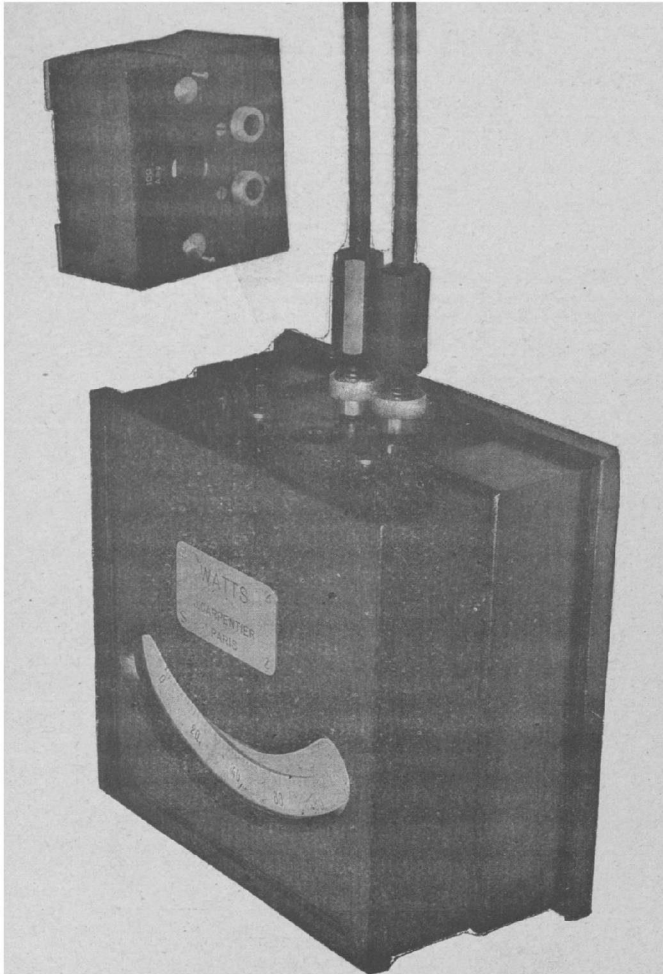


Fig. 19.

la question est plus délicate. On emploie en général des bobines groupées en série ou en parallèle (v. plus loin), mais ceci ne permet d'avoir que deux sensibilités dans le rapport de 1 à 2, ou, au plus, 3 dans le rapport : 1 : 2 : 4 ; de plus, il faut que les bobines mises en parallèle soient identiques, ce qui est difficile à réaliser. On a essayé l'emploi de shunts, comme pour les ampèremètres à cadre mobile, mais l'influence de la température et du coef. de self. de la bobine fixe, rend cette solution très délicate (voir fascicule 21, page 17).

En y ajoutant un bloc contenant une bobine à fil fin, qu'on monte en série avec la bobine mobile, on peut obtenir un voltmètre électrodynamique.

Weston Wattmeter

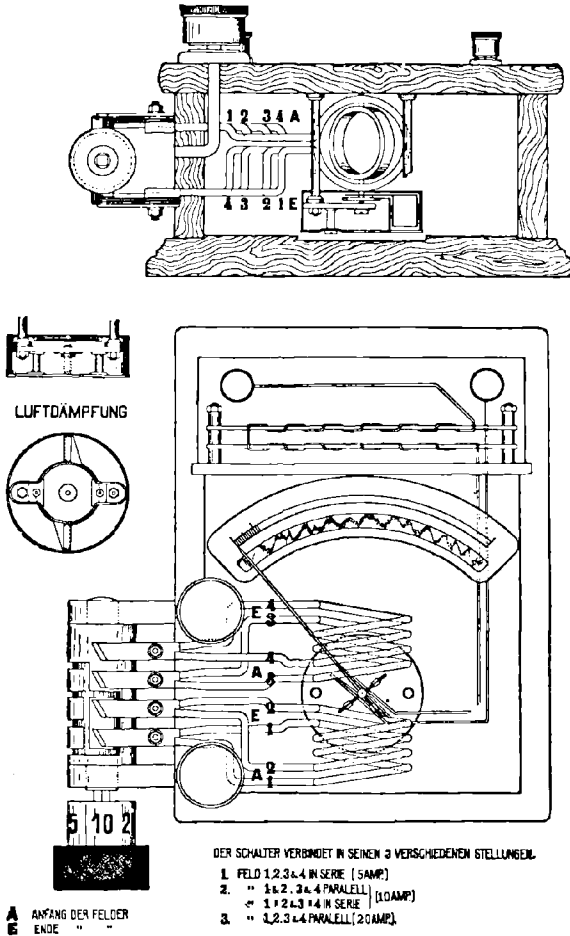


Fig. 20.

mique ; dans ce cas l'appareil porte une graduation pour les watts et une pour les volts.

L'amortissement est à air. Les graduations sont tracées sur les bords

d'un miroir. Le déplacement du zéro peut être corrigé sans ouvrir l'appareil.

Wattmètre Weston (fig. 20). — La bobine fixe se compose de fils ou de rubans de cuivre, de faible épaisseur pour éviter les courants de Foucault ; pour les forts courants on met un certain nombre de ces lames en parallèle. Dans les appareils à deux sensibilités pour les ampères, la bobine fixe se compose de deux parties, qu'on peut mettre en série ou en parallèle à l'aide d'un combinateur à fiches. Dans les appareils à trois sensibilités la bobine fixe contient quatre parties et un commutateur (à gauche de la figure) permet de les mettre en série, en parallèle ou en série-parallèle.

L'échelle n'est pas à graduation proportionnelle ; on a des divisions

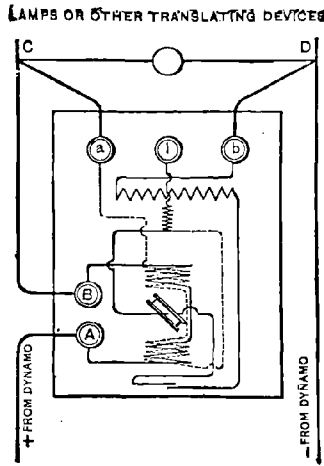


Fig. 20 bis.

plus larges vers le commencement et vers le milieu (voir fasc. 21, page 3).

Le déplacement du zéro peut être corrigé sans ouvrir l'appareil.

Dans les wattmètres à une ou à deux sensibilités un enroulement compensateur (fig. 20^{bis}) corrige l'erreur provenant de la consommation du fil fin.

Les résistances additionnelles de la bobine à fil fin sont enroulées sur des plaques en mica (dispositif Feussner, fasc. 20, p. 91) et protégées par un verni isolant élastique. On construit des calibres de 1 à 400 ampères

et de 75 à 300 volts. Pour les voltages supérieurs on emploie des résistances additionnelles extérieures.

Wattmètres Siemens et Halske. — Ces appareils sont à graduation proportionnelle. Dans l'ancien modèle on est arrivé à ce résultat en formant la bobine de champ à l'aide d'un certain nombre de lames en cuivre ayant la forme (fig. 21), dont on réunissait plusieurs en série pour former des groupements qu'on mettait en parallèle. Dans les nouveaux modèles les

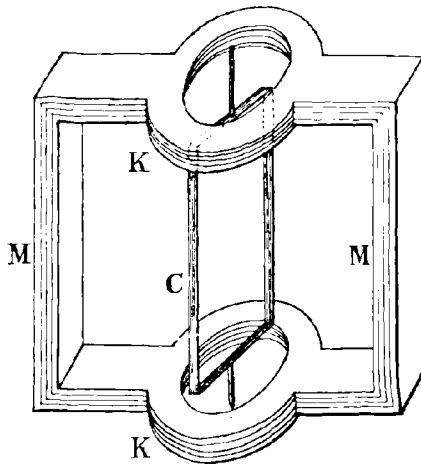


Fig. 21.

bobines ont une forme rectangulaire et sont formées de fils pour les intensités inférieures à 5 ampères ⁽¹⁾ et de lames pour les courants supérieurs (fig. 22). Le cadre mobile est en cuivre ; l'amortissement, à air (fasc. 21, fig. 5). Les appareils ont en général deux sensibilités, qu'on obtient en mettant en série ou en parallèle deux moitiés de la bobine ; cette opération se fait à l'aide de fiches pour les calibres inférieurs à 25 ampères et par des éclisses pour les calibres supérieurs, jusqu'à la limite de 400 ampères.

(1) Pour 5 ampères, la bobine a une résistance totale de $0\omega,2$ à 15° — elle donne donc une chute de tension maxima de 1 volt ; pour $12a,5$ elle a une résistance de $0\omega,026$ à 15° , donc une différence de potentiel maxima de 0,32 volt.

Le circuit de la bobine mobile est construit pour des tensions de

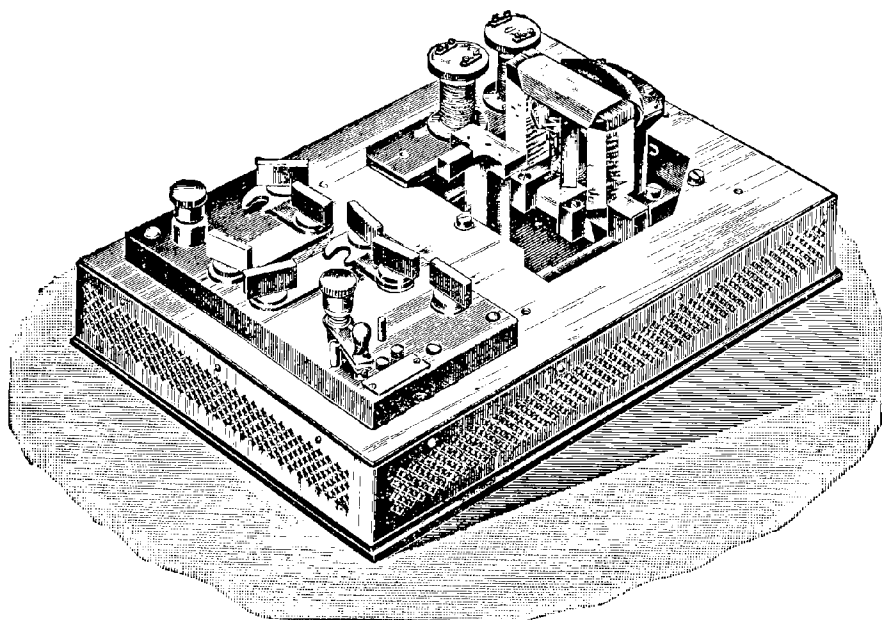


Fig. 22.

30 à 150 volts ; pour les tensions supérieures on emploie des résistances additionnelles extérieures (fig. 23).

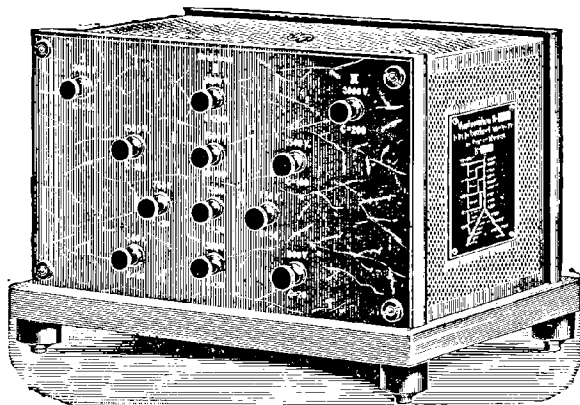


Fig. 23.

Les maisons Chauvin et Arnoux, C^{ie} des Compteurs, J. Richard,

Hartmann et Braun, Wite et Kelvin, C^{ie} Française A. E. G., etc., construisent des wattmètres qui diffèrent peu des précédents. Les wattmètres Chauvin et Arnoux ont une bobine à fil fin de forme intéressante, les wattmètres Kelvin et Dudell Mathieu sont astatiques; parmi les wattmètres de la C^{ie} des Compteurs il y a un type à amortissement produit par un aimant permanent agissant sur un disque métallique, ce qui donne un amortissement énergique. Certains wattmètres de la C^{ie} A. E. G. conte-

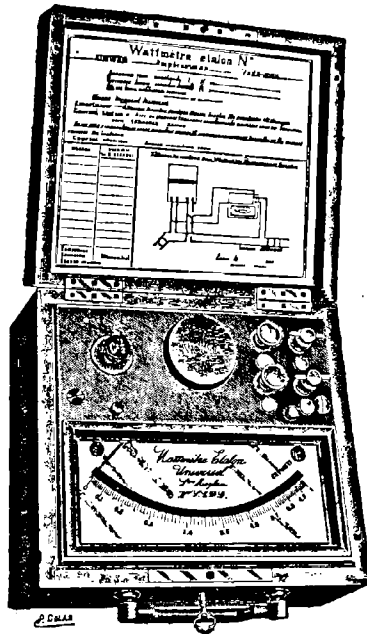


Fig. 24.

naient des tôles de fer, et leur amortissement était aussi obtenu par l'action d'un aimant permanent sur des ailettes métalliques. La figure 24 représente un wattmètre étalon de la C^{ie} des Compteurs.

WATTMÈTRES A INDUCTION OU A CHAMP TOURNANT

Ces appareils ont en général une forme analogue à celle des voltmètres et ampèremètres à induction (fasc. 21, p. 119 et suiv). Ils contiennent

deux bobines fixes : une parcourue par le courant du circuit d'utilisation, l'autre par un courant proportionnel à la différence de potentiel aux bornes de ce circuit et décalé par rapport à elle d'un angle approprié, voisin de 90° . L'équipage mobile est un disque ou un cylindre, en cuivre ou en aluminium : il est soumis à un couple actif proportionnel à la puissance, à un couple antagoniste donné par un ressort et proportionnel à l'angle de déviation et à un couple d'amortissement provenant de l'action d'aimants permanents sur le disque ou cylindre, ou sur un disque solidaire avec lui.

La théorie de ces appareils diffère peu de celle des compteurs d'induction, dont nous nous occuperons, page 77. Tout compteur d'induction peut être transformé en wattmètre ; il suffit de lui ajouter un ressort, une aiguille et un cadran gradué.

Montage. — Ces appareils sont montés à peu près de la même façon que les wattmètres électrodynamiques (page 13). Pour augmenter leur calibre en volts, on peut leur ajouter en série des bobines de self-induction (et non des résistances) de résistances négligeables ; pratiquement l'appareil n'a qu'une sensibilité. Pour avoir plusieurs sensibilités on se sert de transformateurs de tension. Dans le cas des circuits triphasés on emploie la méthode des deux wattmètres avec montage identique à celui des compteurs.

Avantages et inconvénients. — Ce sont les mêmes que ceux des ampèremètres et voltmètres (fasc. 21, p. 119). Ces appareils se répandent beaucoup (à cause de leur robustesse) comme appareils de tableaux. Comme les compteurs de même système, ils peuvent donner une grande erreur pour les circuits fortement inductifs.

La température peut avoir une grande influence sur leur indication, parce que le couple actif varie en raison inverse de la résistance du disque ⁽¹⁾. Parmi les artifices employés pour diminuer cette influence, nous citerons celui de la C^{ie} des Compteurs : une petite pièce en acier-nickel Guillaume est intercalée dans le circuit magnétique des bobines

(1) Cette résistance croît d'environ 0,4 % par degré.

de façon à créer une dérivation magnétique. Lorsque la température augmente la perméabilité de cette pièce diminue, la dérivation magnétique diminue aussi, ce qui augmente le champ dans l'entrefer dans lequel se déplace le disque et le couple actif. Cette augmentation contrebalance la diminution du même couple provenant de la variation de la résistance du disque.

Les wattmètres Siemens et Halske, A. E. G., etc., ont beaucoup d'ana-

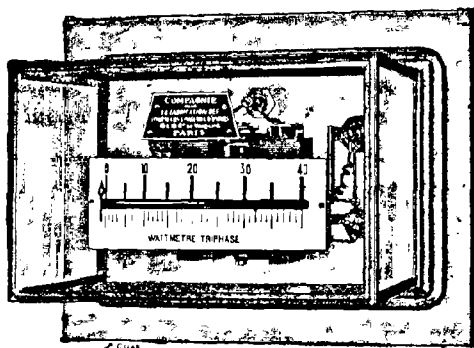


Fig. 25.

logie avec les voltmètres et ampèremètres de même fabrication, les wattmètres Meylan d'Arsonval (ex. figure 25) dérivent du compteur ACT (page 94). Dans le wattmètre Hartmann et Braun l'échelle occupe un angle de 300° environ (1).

(1) Pour les wattmètres thermiques et électrostatiques, voir fascicule 10.

CHAPITRE II

Appareils enregistreurs

Ces appareils inscrivent automatiquement les courbes de variation d'un phénomène en fonction d'un autre.

Dans les appareils de laboratoire, l'inscription se fait souvent photographiquement : un rayon lumineux impressionne une plaque ou un pellicule suivant un trait, qui est la courbe à inscrire. Cette méthode a été appliquée aussi à certains appareils utiles à l'industrie (oscillographes, rhéographes, etc.

Nous ne nous occuperons, dans ce paragraphe, que des enregistreurs mécaniques industriels. Dans ces appareils un style trace un trait sur une feuille de papier couverte de noir de fumée (méthode employée surtout dans les appareils de laboratoire de physique, de physiologie, etc.), ou un crayon ou une plume spéciale inscrit la courbe sur une feuille de papier. On obtient un trait continu ou une série de points.

Les appareils industriels inscrivent habituellement la courbe de variation d'un courant, d'une différence de potentiel, d'une puissance, etc., en fonction du temps. Leur utilité est très grande, surtout dans les Stations Centrales, parce qu'ils permettent de contrôler la régularité de la marche des machines, la constance de la tension du réseau, etc., et en particulier ils renseignent sur les soins que le personnel met à assurer la régularité du fonctionnement de l'usine. Les wattmètres enregistreurs permettent de se rendre compte de la façon dont se fait la consommation de la puissance.

Un appareil enregistreur se compose en général de trois parties : l'appareil de mesure, le système inscripteur, et la partie qui porte le papier et lui donne un mouvement proportionnel au temps.

Appareil de mesure. — L'appareil de mesure est analogue aux appareils courants, mais il doit remplir certaines conditions spéciales : son couple actif (couple directeur) doit être grand, pour que le frottement de la plume sur le papier (qu'on cherche à réduire au minimum, mais qu'on ne peut pas rendre négligeable) ne fausse pas les résultats : on est amené à avoir des équipages mobiles plus lourds et des consommations plus fortes. Les fortes consommations sont peu gênantes dans ces appareils parce qu'on ne les emploie qu'en petit nombre.

On s'arrange, le plus possible, pour que la déviation de l'aiguille soit proportionnelle à la quantité à mesurer ; dans ce cas le papier peut être gradué en parties égales. Dans le cas contraire on est forcé d'avoir du papier spécial pour chaque instrument⁽¹⁾.

Système inscripteur. — Habituellement l'aiguille de l'appareil de mesure porte la plume inscriptrice ; dans certains cas l'aiguille de l'appareil de mesure dirige une deuxième aiguille qui inscrit, (exemple : Ondographe Hospitaler, ; quelquefois le mouvement de l'aiguille inscriptrice est produit par un petit moteur, et l'appareil de mesure sert à provoquer et diriger le mouvement de ce moteur (appareils à servomoteurs).

L'inscription est continu ou par points ; dans le dernier cas un système approprié fait appuyer la plume sur le papier ou celui-ci sur la plume⁽²⁾ à des intervalles réguliers et juste le temps nécessaire. Dans certains appareils (exemple : certains types Siemens et Halske) ce sont des étincelles produites par une bobine d'induction qui donnent les points sur le papier. Les enregistreurs à points sont employés surtout pour enregistrer des phénomènes à variations relativement rapides, ou lorsqu'on

(1) On emploie quelquefois du papier à graduation proportionnelle et on indique la correspondance entre celle-ci et les déviations de l'appareil.

(2) Ceci arrive par exemple dans les enregistreurs de Ferry.

ne peut avoir qu'un faible couple directeur (exemple : enregistrement du courant de démarrage, du courant absorbé par les moteurs de ponts roulants ou ascenseurs, pyromètres enregistreurs).

Plumes. — La plume doit pouvoir inscrire avec le frottement minimum. On emploie très souvent la plume Richard ou ses dérivées. La plume Richard (fig. 26, *a*) se compose d'un godet en forme de pyramide

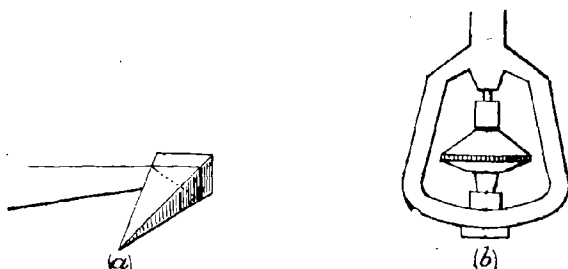


Fig. 26.

triangulaire dont la base et une des faces latérales manquent. On remplit ce godet d'encre spéciale ; le bout de la plume, légèrement fendu, frotte très faiblement sur le papier et trace un trait par capillarité.

Chauvin et Arnoux emploient quelques fois une plume formée de deux coquilles légères (fig. 26 *b*) entre lesquelles est serrée une rondelle en matière poreuse, imbibée d'encre fournie par un réservoir qui se trouve dans la coquille supérieure. L'ensemble tourne autour d'un axe ; la plume roule sur le papier et fait un trait : on remplace ainsi un frottement de glissement par un frottement de roulement qui est très faible.

Mouvement. — Le papier est en général monté sur un cylindre auquel un mouvement d'horlogerie imprime une rotation uniforme : on change le papier lorsque le cylindre a fait un tour. Dans les appareils à déroulement continu l'inscription se fait sur un rouleau de papier de grande longueur (normalement de 20 à 50 mètres) qui est entraîné par un mouvement d'horlogerie. Dans les nouveaux appareils Carpentier (fig. 28) le papier a un mouvement descendant et prend, dans la partie utile, la forme d'un cylindre ayant pour axe l'axe de l'appareil de mesure.

Diagrammes. — Les aiguilles des appareils de mesure tournent habituellement autour d'un axe, leur extrémité décrit un arc de cercle et les ordonnées des diagrammes sont curvilignes. Ceci n'a aucun inconvénient quand il s'agit seulement de se rendre compte de la variation d'un phénomène, mais on se sert souvent du diagramme pour avoir l'intégrale de la fonction inscrite (par exemple le diagramme d'un wattmètre permet de trouver l'énergie consommée dans un temps donné). Dans ce cas, si les ordonnées sont rectilignes, on peut planimétrer la surface; si elles sont circulaires on doit retracer la courbe en coordonnées rectilignes.

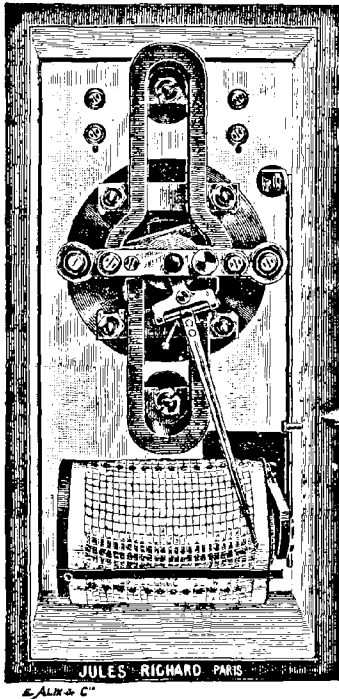


Fig. 27.

un mouvement de rotation uniforme. Ce cylindre peut être facilement retiré; de plus on peut, par le remplacement de deux pignons, changer sa vitesse de rotation (fig. 27).

Les appareils à cadre mobiles ont leurs systèmes magnétiques formés

C'est pourquoi certains constructeurs (Carpentier, Hartmann et Braun, Olivetti, Siemens et Halske, etc.) emploient des dispositifs particuliers pour avoir les ordonnées rectilignes.

Les premiers bons enregistreurs électriques ont été construits par la maison Richard. Aujourd'hui un grand nombre de constructeurs en fabriquent (Compagnie des compteurs, Chauvin et Arnoux, Carpentier, Richard, Olivetti, A.E.G., Hartmann et Braun, Siemens et Halske, etc.). Nous décrivons quatre appareils à titre d'exemples.

Enregistreurs Richard. — Les appareils Richard sont à coordonnées curvilignes. Le papier est enroulé sur un cylindre, à l'intérieur duquel se trouve le mouvement d'horlogerie qui lui imprime

de deux aimants, qui laissent entre leurs épanouissements polaires deux espaces annulaires dans lesquels se trouvent les côtés latéraux de la bobine mobile, montée sur un cadre amortisseur.

L'axe de l'équipage mobile est terminé par deux pivots, roulant dans

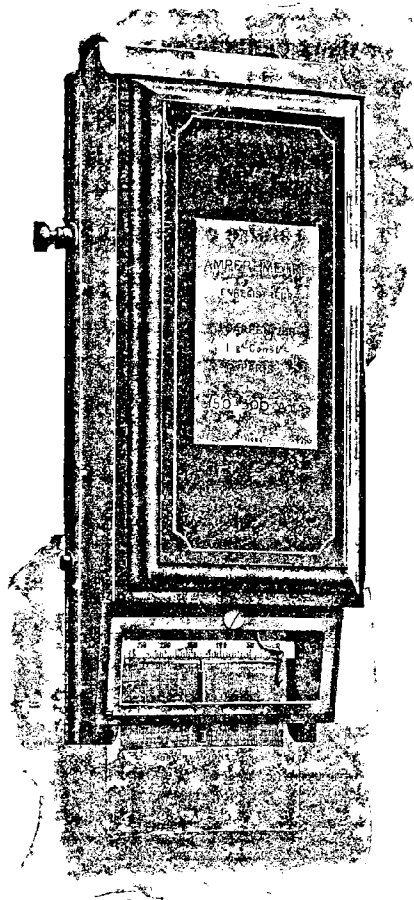


Fig. 28.

des crapaudines à ressorts. Les ressorts ont pour rôle d'éviter la rupture des pivots pendant le transport et le montage. Deux ressorts spiraux amènent le courant à la bobine mobile et donnent aussi le couple antagoniste.

Les constantes du cadre diffèrent suivant qu'il s'agit d'un voltmètre ou d'un ampèremètre : ceux-ci sont à shunt extérieur.

Enregistreurs Carpentier à ordonnées rectilignes (fig. 28). — Dans ces appareils le papier est guidé dans un couloir cylindrique dont l'axe vertical coïncide avec celui de l'équipage mobile. Le mouvement d'horlogerie fait tourner deux petits pignons. Une manette permet d'appuyer, à l'aide de deux petits galets, le papier sur les pignons. Le papier est alors entraîné.

L'aiguille, de forme spéciale, fait appuyer la plume sur la face intérieure du papier et donne une pression à peu près indépendante du poids de l'encre. Il est facile de se rendre compte que la disposition de l'appareil donne des coordonnées rectilignes.

Enregistreurs Chauvin et Arnoux à inscription discontinu (fig. 29).

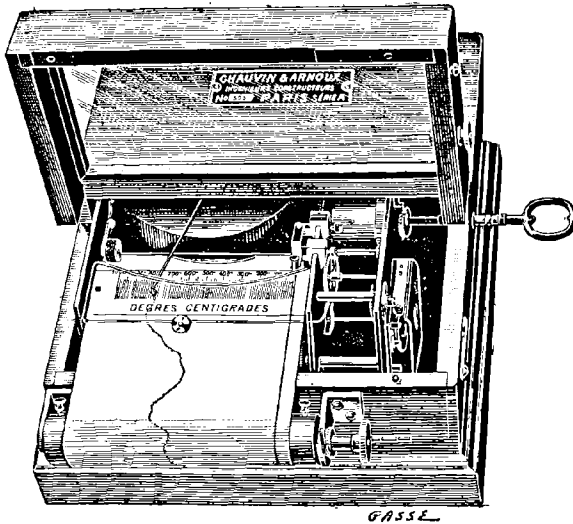


Fig. 29.

— Ce sont des galvanomètres à cadre mobile, à pivots ou à suspension élastique. On les fait pour les sensibilités suivantes :

Types à pivot	$\left\{ \begin{array}{l} 1^{\circ} \\ 2^{\circ} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{déviation} \\ \text{»} \\ \text{»} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{maxima} \\ \text{»} \\ \text{»} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{par} \\ \text{»} \\ \text{»} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 0,02 \\ 0,025 \\ 0,00005 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{ampères} \\ \text{»} \\ \text{»} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{et} \\ \text{»} \\ \text{»} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 0,2 \\ 0,01 \\ 0,005 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{aux} \\ \text{»} \\ \text{»} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{bornes} \\ \text{»} \\ \text{»} \end{array} \right.$
Types à suspension	$\left\{ \begin{array}{l} 1^{\circ} \\ 2^{\circ} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{»} \\ \text{»} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{»} \\ \text{»} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{»} \\ \text{»} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 0,0002 \\ \text{»} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{»} \\ \text{»} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{»} \\ \text{»} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 0,001 \\ \text{»} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{»} \\ \text{»} \end{array} \right.$	

Ils sont employés surtout, avec des couples thermoélectriques, pour l'enregistrement de la température.

La plume est très légère et formée d'un tube aplati enserrant une matière poreuse. On l'emmanche à frottement doux à l'extrémité de l'aiguille ; elle ne touche le papier que pendant un temps très court et toutes les 15 secondes. Le contact est établi par un étrier qui presse sur la plume et dont le mouvement est commandé par une came, calée sur le dernier mobile du mouvement d'horlogerie.

Wattmètre enregistreur à servomoteur Olivetti (fig. 30). — Dans cet appareil, l'aiguille inscriptrice (30) est mise en mouvement par un petit moteur (18) dont le mouvement est amorti à l'aide d'un disque (40) qui se déplace entre les pôles d'un aimant (41). Le *wattmètre* proprement dit est formé, dans le cas de la figure, qui correspond à un appareil triphasé, de deux bobines fixes (8) et (9) et de deux bobines mobiles solitaires (1) et (2) montées sur le même axe (4). Le couple antagoniste est donné par un ressort (13) dont une extrémité est fixée à un axe (15) situé dans le prolongement de (4) et l'autre extrémité est reliée à une lame (14) solidaire avec l'axe (4) et qui peut produire le déplacement d'une tige (22). Cette tige établit les contacts (23) ou (24) qui ferment le circuit du moteur et le font tourner dans un sens ou dans l'autre.

L'axe de ce moteur porte une vis sans fin, qui engrène d'un côté avec un pignon qui entraîne une crémaillère (27) portant l'aiguille (30) et de l'autre à un pignon (16) solidaire de l'axe (15).

Le fonctionnement du système est le suivant :

Tant que la puissance garde une valeur constante le moteur est arrêté et l'aiguille inscrit une droite parallèle à l'axe des abscisses. Si la puissance varie, l'équipage mobile du wattmètre change de position, entraîne la pièce (22) qui établit le contact (23) ou (24), ce qui fait tourner le moteur dans un sens convenable et déplace l'aiguille (30). Le mouvement du moteur fait en même temps tourner le pignon (16), qui tend ou détend le ressort (13) jusqu'à ce que le couple de torsion équilibre le couple actif du wattmètre. La tige (22) se déplace, coupe le circuit du moteur et l'aiguille s'arrête à la position correspondant à la puissance considérée.

La consommation maxima de cet appareil est de 18 watts pour les bobines fixes, 2 watts, 5 pour les bobines mobiles, pour une différence

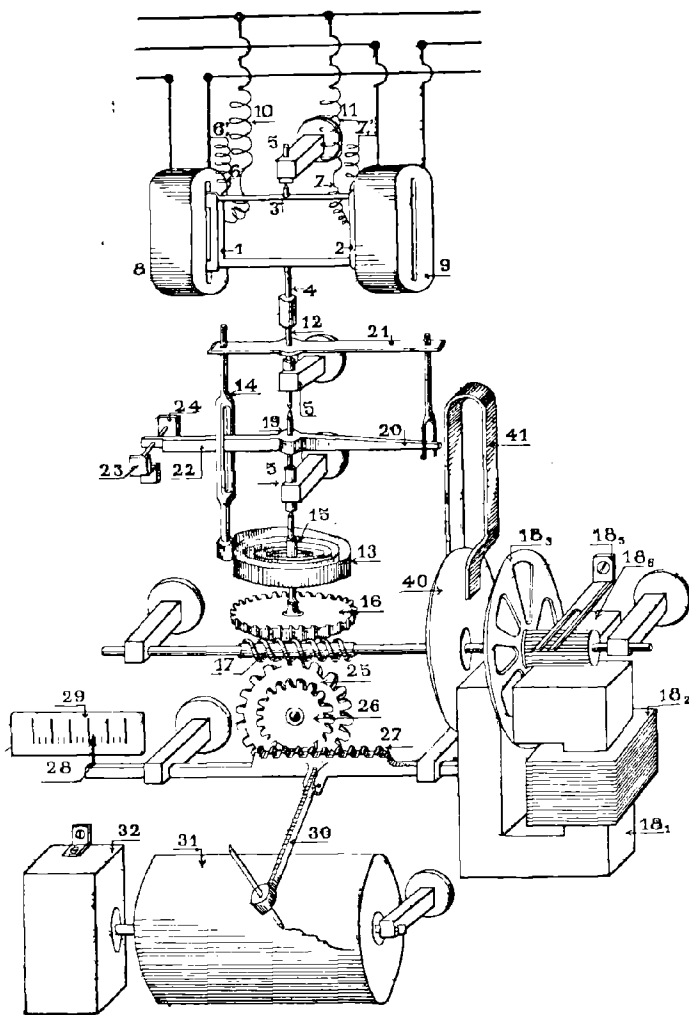


Fig. 30.

de potentiel de 100 volts, et 30 à 40 watts pour le moteur.

La courbe est obtenue en coordonnées rectilignes.

CHAPITRE III

Mesure de l'Energie Electrique

Généralités. — *L'énergie électrique* est la quantité la plus importante à mesurer en Electricité. C'est en effet *l'énergie consommée* que payent les abonnés d'un secteur ; c'est aussi de l'énergie produite que dépend la quantité de combustible consommée par les usines à vapeur, à gaz, à pétrole, etc., ou la quantité d'eau utilisée par les usines hydrauliques.

Méthodes de mesure. — On sait que l'énergie est liée à la puissance instantanée par la relation (V. page 1).

$$dW = p dt$$

d'où

$$W = \int_0^t p dt.$$

Or, on peut écrire

$$\int_0^t p dt = \int_0^{\Delta t} p dt + \int_{\Delta t}^{2\Delta t} p dt + \dots + \int_{i\Delta t}^{(i+1)\Delta t} p dt + \dots + \int_{(n-1)\Delta t}^t p dt,$$

en posant $t = n\Delta t$, Δt étant assez petit pour que la *puissance moyenne* ne varie pas sensiblement dans cet intervalle et assez grand par rapport à la période propre du courant lorsqu'il s'agit d'un courant périodique (en particulier alternatif).

Or on a, avec une grande approximation,

$$\int_{i\Delta t}^{(i+1)\Delta t} p dt = P_i \cdot \Delta t,$$

P_i étant la puissance moyenne dans l'intervalle $i\Delta t$ à $(i+1)\Delta t$. On a donc

$$(15) \quad W = \Sigma P_i \cdot \Delta t.$$

De la formule (15) il résulte que, pour mesurer l'énergie consommée dans un circuit pendant un temps t , il suffit de mesurer la puissance moyenne à des intervalles assez rapprochés, et faire la somme des produits de la puissance par l'intervalle correspondant. On peut aussi évaluer l'aire de la courbe de P_i en fonction de t , courbe tracée à la main ou décrite par un wattmètre enregistreur.

Il arrive souvent que toute l'énergie employée est transformée en chaleur. Dans ce cas on peut employer une méthode calorimétrique, à condition qu'on puisse plonger toutes les parties du circuit dans des calorimètres.

Une autre méthode de mesure, applicable seulement aux courants continus, résulte des considérations suivantes : on a

$$W = \int UI dt.$$

Si la distribution se fait à différence de potentiel constante, on a

$$W = U \int I dt = U \cdot Q.$$

Il suffit donc de mesurer la quantité d'électricité qui a traversé le circuit pour avoir l'énergie. La mesure de la quantité d'électricité peut se faire à l'aide d'un ampèremètre enregistreur, ou d'un ampèremètre ordinaire dont on relève les indications à des intervalles réguliers, ou encore en faisant passer le courant ou une fraction connue de celui-ci dans une cuve électrolytique (1).

Les méthodes indiquées sont longues, souvent peu précises et ont surtout l'inconvénient de ne pas être à la portée de tous. Or, tous ceux

(1) Ceci est le principe des compteurs électrolytiques.

qui emploient l'électricité doivent se rendre compte rapidement de l'énergie qu'ils ont à payer — c'est dans ce but qu'ont été créés les *Compteurs Electriques*, qui indiquent directement, en unités connues, l'énergie consommée dans un temps donné — et quelquefois même le prix à payer.

Unités. — L'unité d'énergie du système C. G. S. pratique c'est le *joule*, qu'on définit de la même manière que le watt. Le *joule* est un *watt-seconde*.

Le joule vaut 10^7 ergs. Dans la pratique courante on emploie le *watt-heure*, qui est l'énergie absorbée dans une heure par un circuit de puissance de un watt. On emploie très souvent les multiples du watt-heure : l'*hectowattheure* (= 100 W. H) et le *kilowattheure* (= 1000 W. H).

COMPTEURS

Les *compteurs* électriques sont des appareils qui mesurent l'énergie électrique ou la quantité d'électricité consommée pendant un certain temps, ou seulement le temps pendant lequel un circuit consomme l'énergie électrique.

On aura donc trois genres de compteurs :

1° Les *compteurs horaires* ; 2° les *compteurs de quantité* ou les *ampèreheuremètres* ; 3° les *compteurs d'énergie* ou les *wattheure-mètres*.

Les appareils 2° et 3° peuvent être : simples, à double tarif, à tarif multiple, à dépassement, à paiement préalable, à tarif maximum, etc. On construit aussi des compteurs pour contrôler la charge et la décharge des accumulateurs, des compteurs suspendus pour les tramways, etc.

Au point de vue du système de distribution pour lequel ils sont construits, on peut partager les compteurs en :

1. *Compteurs à courant continu* : a) pour distribution à 2 fils ; b) pour distribution à 3 ou 5 fils.

2. *Compteurs à courant alternatif* : a) Monophasé pour distribution à 2 fils ; b) monophasé pour distribution à 3 ou 5 fils ; c) triphasé 3 fils ; d) triphasé 4 fils ; e) diphasé 3 fils.

D'après le principe et les particularités de leur construction les principaux compteurs peuvent être classés d'après le tableau suivant :

		I. Compteurs électrochimiques (1) ou électrolytiques		C. Edison C. Bastian C. Wright C. Stia	
II. Compteurs électro-mécaniques	a) Compteurs moteurs	1° Compteurs électromagnétiques	Moteurs à collecteur	Non amortis ex. O'K Amortis { A. E. G. Aron Mix et Genest Isaria Hartmann et Braun	
			Moteurs sans col. (Compteurs à mercure)	Chamberlain et Hookham Ferranti	
			2° Compteurs électrodynamiques	Moteurs à collecteurs	C. Thomson (2) C. Vulcain Sans fer { C. Isaria C. Hartmann et Braun C. Laudys et Gyr.
				Moteurs sans collecteurs (Compteurs à mercure)	avec fer { C. Lahmeyer dans l'induit } C. Veritas Induits et inducteurs fixes, fer mobile } Siemens et Halske
		3° C. d'induction ou à champs tournants	Moteurs à collecteurs	Chamberlain et Hookham Sangamo Electric Co	
			C. à cylindre mobile	ex. Siemens et Halske.	
			C. à disques	ACT (C ^{ie} des Compteurs) Cosinus (C ^{ie} Continentale des Compteurs) BT (C ^{ie} de Construction électrique) Japy A. E. G. Aron Westinghouse Landys et Gyr Theiler Ferranti Mix et Genest Lahmeyer Blaty (Ganz et C ^{ie}) Siemens Schukert et C ^{ie} Hartmann et Braun Isaria	
		b) Compteurs à servomoteurs	Servomoteur mécanique	Compteur à balancier Aron.	
			Servomoteur électrique	Oscillant : Compteur oscillant A. E. G. Rotatif : Compteur à servomoteur Brillé.	
		c) à intégration discontinu	Brillé Braun et Routin Raps (Siemens et Halske) Holden		

(1) Dans ces compteurs une fraction connue du courant traverse une cuve électrolytique. Des dispositifs appropriés permettent de se rendre compte de la quantité de substance décomposée, qui est proportionnelle à la quantité d'électricité consommée. Ces compteurs sont relativement peu répandus.

(2) Les compteurs genre Thomson sont construits par les maisons : C^{ie} pour la fabrication des compteurs (sous deux formes différentes, v. page 74), C^{ie} de construction électrique C^{ie} A. E. G., C^{ie} des Compteurs Aron, Duncan Electric Mfg Co.

Conditions que doit remplir un bon compteur. — Nous avons vu fascicule 21, page 1 et suivantes, les conditions que doivent remplir les appareils de mesure en général. Pour les compteurs, il y a aussi des conditions qui leurs sont spéciales. On devrait les appliquer toutes avec plus de rigueur, mais il est difficile de le faire.

Les exigences sont plus grandes pour les compteurs : parce qu'ils mesurent l'énergie qui est la quantité qu'on paye ; parce qu'il sont très répandus, donc, plus sujets à se trouver dans des conditions défavorables, auxquelles ils doivent résister ; parce que ceux pour lesquels ils doivent fonctionner n'y connaissent souvent rien et il suffit d'un faible défaut apparent, pour que l'appareil soit déprécié,

D'autre part, par le mode de fonctionnement de la plupart de ces appareils (*dynamique* au lieu de *statique*) il est difficile de satisfaire aux conditions demandées, dont les principales sont : 1° *Lecture rapide, indication directe de la quantité à mesurer en unités appropriées* ; 2° *Robustesse* ; 3° *Exactitude dans de larges limites de puissance, démarrage facile, marche à vide empêchée, fonctionnement sûr* ; 4° *Influence de la température et de l'état hygrométrique ambiant négligeable* ; 5° *Influence des vibrations et des champs magnétiques extérieurs négligeable* ; 6° *L'exactitude de l'appareil doit se conserver longtemps* ; 7° *Faible consommation propre* ; 8° *Indépendance de la fréquence, de la forme des courbes du courant et du facteur de puissance, pour les appareils à courants alternatifs* ; 9° *Impossibilité de fausser l'exactitude de l'appareil* ; 10° *Possibilité d'un étalonnage rapide* ; 11° *Simplicité, montage facile et prix modéré.*

Nous allons indiquer rapidement les difficultés qu'on a à satisfaire à ces conditions, souvent contradictoires et les moyens employés pour y arriver.

1° *Lecture rapide, indication directe de la quantité à mesurer.* L'équipage mobile des compteurs engrène avec un mouvement d'horlogerie qui fait tourner des aiguilles devant des cadrans ou place des chiffres devant une série d'ouvertures. Les aiguilles ou les chiffres indiquent, en unités pratiques, l'énergie consommée ; quelquefois ils indiquent même le prix à payer.

2° *Les compteurs doivent être robustes.* Cette condition est particulièrement intéressante. Les compteurs sont construits en très grand nombre. On les transporte par centaines dans toutes les parties du monde, et il est difficile, étant donné leur grand nombre, de prendre pour le transport toutes les précautions utiles ; il faut donc que l'appareil soit bien robuste.

Les parties délicates des compteurs sont les pivots des équipages mobiles. Pour ne pas les abîmer dans le transport, il suffit, lorsque l'équipage est relativement léger (exemple : pour les compteurs d'induction) de les caler à l'aide d'une épaisseur de papier ; pour les équipages lourds on prévoit des systèmes permettant de les soulever et de les faire appuyer sur des parties autres que les pointes des pivots.

Mais tous les équipages sont relativement lourds (25 à 50 grammes dans les appareils à induction, 150 à 250 grammes dans les appareils à collecteur).

On est amené à ce poids parce que le *couple actif* doit être grand⁽¹⁾ pour que le couple provenant des frottements des pivots sur leur support et des balais sur leur collecteur, quand il y en a, et le couple nécessaire au mouvement d'horlogerie, soient négligeables. Pour que le couple actif soit suffisamment grand on doit : dans les appareils à bobines mobiles mettre beaucoup d'ampèretours sur ces bobines, dans les appareils d'induction employer un disque peu résistant et de grand diamètre.

Dans tous les cas on aura, comme on a vu, des poids relativement grands.

Pour supporter ces poids pendant la marche du compteur les pivots doivent être bien soignés ; on les fait en acier très dur et ils tournent sur un saphir ; des artifices particuliers donnent une suspension élastique qui garantit les pivots contre les chocs et les vibrations.

3° *Le compteur doit être exact dans de larges limites de la puissance.*

(1) Il est de l'ordre de 1 000 à 10 000 ergs dans les compteurs d'induction, de 10 000 à 30 000 environ dans les appareils à collecteurs, tandis qu'il varie de 200 à 1 200 environ dans les appareils statiques : voltmètres, wattmètres, etc.

Il ne doit pas marcher à vide⁽¹⁾ mais doit démarrer pour une très faible charge. Les compteurs doivent être exacts à partir du vingtième de leur charge maxima. L'arrêté du Ministre des Travaux Publics du 2 juin 1909, complété par celui du 13 Août 1910, fixe les limites suivantes de l'erreur admise pour « les compteurs servant à mesurer l'énergie électrique livrée au public par les concessionnaires ou permissionnaires de distribution publique d'énergie électrique » : Pour les appareils de calibre supérieur à 5 hectowatts : $\pm 3\%$ en pleine charge et à demi-charge, $\pm 5\%$ au 20^e de la charge maxima ; pour les appareils de calibre inférieur ou égal à 5 hectowatts : $\pm 3\%$ en pleine charge et à demi-charge, ± 2 watts au régime de 20 watts.

Les conditions d'exactitude sont difficiles à remplir, à faible charge, à cause des frottements des pivots sur leur pierre, des balais sur le collecteur — pour les compteurs qui en possèdent — et des mouvements d'horlogerie (sur lesquels on a fait de très grands progrès depuis quelques années). Pour réduire les frottements des balais on leur fait toucher le collecteur en des points bien définis, pour qu'il n'y ait pas de contacts insuffisants au point de vue électrique et qui donnent des frottements inutiles (les balais sont formés de plusieurs fils, ou de lames touchant le collecteur par leurs tranches) ; on réduit aussi au minimum nécessaire la pression des balais (de 0,6 à 1 gramme environ par balai).

Une fois le couple de frottement réduit au minimum on compense ce qui en reste, en créant un couple actif supplémentaire constant. Ce couple compensateur ne doit pas être trop grand, parce qu'alors l'appareil fonctionnerait à vide ; mais il doit être suffisant pour compenser les frottements. On emploie quelquefois des artifices particuliers pour empêcher la marche à vide.

4^e La température, l'état hygrométrique et les poussières qui se trouvent dans le milieu ambiant, ne doivent pas influencer la marche du compteur. Pour diminuer l'influence de la température on emploie des artifices, dont nous parlerons à propos de chaque système de compteurs.

(1) On dit qu'un compteur marche à vide, s'il tourne lorsque le courant passe dans la bobine « volts » seulement. La marche à vide même très faible impressionne mal le public non électricien.

Quant à l'humidité et aux poussières on les évite en fermant l'appareil dans des boîtes hermétiquement closes.

5° *L'appareil doit être peu sensible aux vibrations et aux champs magnétiques extérieurs.* (Voir fascicule 20, page 3 et fascicule 21, page 6).

Comme les appareils statiques de même systèmes, les compteurs électromagnétiques et d'induction sont peu influencés par les champs extérieurs ; les appareils électro-dynamiques le sont davantage. Pour ces derniers on a créé des équipages astatiques (voir compteurs Thomson type B et compteur Aron à balancier).

6° *L'appareil doit rester longtemps exact.* Pour cela il faut que les aimants permanents soient de très bonne qualité (voir aussi fascicule 21, page 5) ; le frottement des pivots, et celui des balais sur les collecteurs, doivent être faibles ; l'équipage le plus léger possible.

Les constructeurs prévoient des moyens de réglages pour faire varier l'action des aimants par leur déplacement.

Le contrôle du pivot et le changement du saphir de la crapaudine sont faciles à faire ; il en est de même pour le nettoyage des balais et du collecteur.

Il est bon de vérifier souvent (une fois par an, par exemple) que les appareils restent exacts.

7° *La consommation propre doit être faible.* — On doit se préoccuper surtout de celle des bobines à fil fin, qui est constante dans le cas des distributions à tension constante.

Le nombre des compteurs d'un secteur étant très grand, et la puissance de leurs fils fin étant fourni par le secteur sans que le client la paye, la réduction de cette consommation a une réelle importance.

Les fils fins des compteurs actuels consomment environ 1 à 4 watts pour 110 volts.

8° *Faible influence de la fréquence, de la forme du courant et du décalage, pour les appareils à courant alternatif.* — Les compteurs électrodynamiques peuvent fonctionner en courant alternatif — en em-

ployant certains artifices pour corriger l'influence de la self-induction du fil fin — mais ils sont peu employés dans ce cas, excepté le compteur à balancier Aron.

Les compteurs d'induction, presque exclusivement employés, peuvent être rendus peu sensibles à la fréquence et à la forme de la courbe, pour de faibles variations de celles-ci ; on peut aussi les rendre suffisamment exacts pour les valeurs de $\cos \varphi$, qui interviennent normalement dans la pratique.

9° *Impossibilité de fausser l'exactitude du compteur.* — Pour cela toutes les parties sont enfermées dans une boîte qu'un plomb empêche d'ouvrir.

10° *Étalonnage facile.*

11° *Simplicité, montage facile, prix modéré.* — Plus l'appareil est simple et moins il aura d'organes délicats, moins il sera exposé à se détériorer et à se dérégler. D'autre part le prix a une très grande importance, parce que le plus grand nombre de compteurs sont installés chez des abonnés qui consomment peu d'énergie. Or un abonné qui consomme annuellement 50 ou 100 francs d'énergie électrique — et ceux-ci tendent à devenir la très grande majorité — ne voudra pas immobiliser une somme trop élevée dans l'achat d'un compteur ni payer une location trop élevée ; d'autre part les secteurs non plus ne peuvent immobiliser une somme trop grande pour chaque abonné.

Le prix des compteurs électromécaniques les plus simples est d'environ 60 francs.

I. — COMPTEURS ÉLECTRO-CHIMIQUES

Comme type de compteur électro-chimique nous allons décrire le compteur électrolytique à mercure Stia (1). Ce compteur est un ampère-heuremètre. La figure 31 représente une section de l'appareil et un

(1) Voir *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, février 1911.

schéma de montage. Le compteur Stia se compose d'un voltamètre dont l'anode A est formée par du mercure qui remplit une rigole circulaire.

La cathode K est une plaque en iridium ; le bain électrolytique est formé d'une solution aqueuse d'iodure de potassium mercureux.

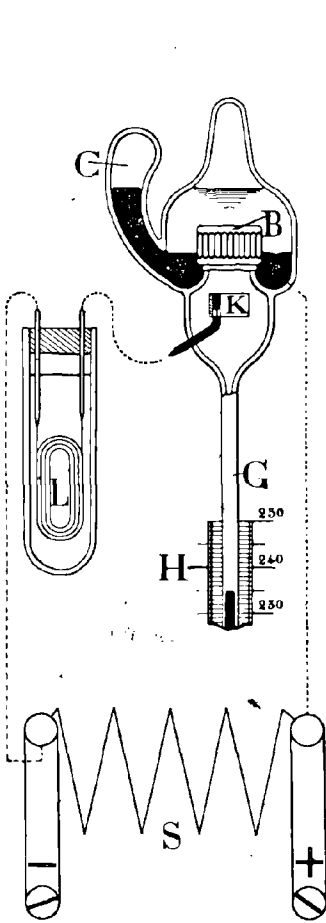


Fig. 31.

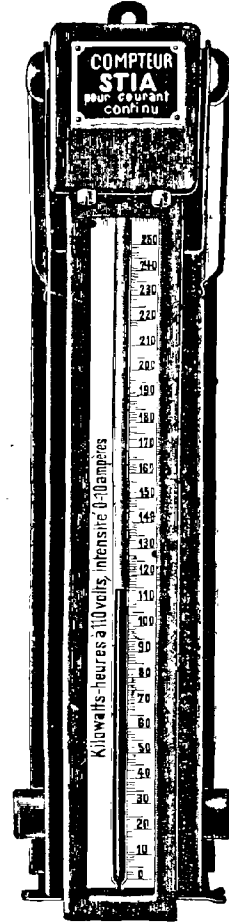


Fig. 32.

L'appareil contient 10 centimètres cubes environ d'électrolyte et environ 60 grammes de mercure.

Comme l'indique la figure, le courant principal traverse un shunt S sur lequel se trouve dérivé le voltamètre, en série avec une forte résis-

tance L ; on s'arrange pour ne faire passer dans le voltamètre que le $\frac{1}{100}$ du courant principal.

Le fonctionnement de l'appareil est le suivant : lorsque le courant traverse le voltamètre, le mercure se dissout à l'anode et une quantité égale se sépare de l'électrolyte à la cathode. Comme l'iridium ne s'amalgame pas avec le mercure, celui-ci s'écoule dans un tube. La quantité de mercure libérée étant proportionnelle à la quantité d'électricité qui a traversé l'électrolyte, laquelle est proportionnelle à celle qui a passé dans le circuit, on peut graduer le tube en unités de quantité d'électricité (en ampèreheures par ex.) ou en unités d'énergie, si la distribution est à potentiel constant.

Lorsque le tube est rempli on renverse l'appareil et le mercure retourne à l'anode ; ce renversement peut être fait par exemples tous les mois par l'employé de la station centrale.

Pour le bon fonctionnement du compteur on prend un certain nombre de précautions : ainsi on s'arrange pour que le mercure ait toujours le même niveau à l'anode et que la concentration de l'électrolyte soit à peu près la même dans toutes les parties du liquide. On met en série avec le voltamètre une résistance L formée de manganine et de nickel, dans des proportions telles, que son coefficient de température soit l'inverse de celui du voltamètre — de façon que la résistance totale ne varie pas avec la température.

La différence de potentiel maximum aux bornes du shunt est d'environ 0,5 volt.

La figure 32 représente un de ces compteurs, dont il existe plusieurs types.

On construit des compteurs Stia pour charge et décharge d'accumulateurs, des compteurs à double tarif, etc.

II. — COMPTEURS ELECTRO MÉCANIQUES

Dans ces appareils il existe toujours au moins une partie mobile. Celle-ci engrène avec un mouvement d'horlogerie, dont les aiguilles ou

les chiffres sauteurs indiquent, en unités connues, l'énergie ou la quantité d'électricité consommée, quelquefois même le prix de cette énergie.

Les compteurs électromécaniques sont de types très variés (voir la classification, page 46). Nous ne nous occuperons que des compteurs moteurs, pendulaires et oscillants, qui sont presque seul employés aujourd'hui.

A) COMPTEURS MOTEURS

Ce sont de véritables petits moteurs magnétoélectriques, dynamo-électriques ou d'induction.

Dans ces compteurs l'énergie enregistrée est proportionnelle au nombre de tours de l'équipage mobile.

On écrit la relation entre l'énergie et le nombre de tours sous les formes :

$$(16) \quad P \cdot t = p \cdot n$$

ou

$$(17) \quad P \cdot t = 3600 \cdot K \cdot n,$$

P étant la puissance du circuit, supposée constante, t le temps, n le nombre de tours; p et K sont appelés, l'un ou l'autre, la *constante* du compteur.

Si P est exprimée en watts, p est l'énergie par tour en joules et K l'énergie par tour en watt-heures.

Étalonner un compteur, c'est vérifier que la constante est bien celle indiquée par le constructeur, ou celle qui correspond à l'énergie qu'enregistre le compteur.

COMPTEURS MAGNÉTOÉLECTRIQUES

Compteurs non freinés (Compteur O'Keanan⁽¹⁾ dit O'K). Description (fig. 33). — Le compteur O'K se compose d'une petite magnéto fon-

⁽¹⁾ Construit par la Cie pour la fabrication des Compteurs.

tionnant à vide. L'inducteur est un aimant permanent, auquel on a donné une forme appropriée, de façon à avoir un entrefer à grande surface et la ligne de force moyenne dans l'aimant la plus longue possible (1). Entre les pôles de cet aimant se trouve un cylindre en fer doux, fixe aussi, qui laisse deux entrefers dans lesquels se déplace l'induit. Celui-ci a la forme d'une cloche renversée. Il est formé d'un enroulement genre tambour, enroulé sur une carcasse en carton renforcé sur

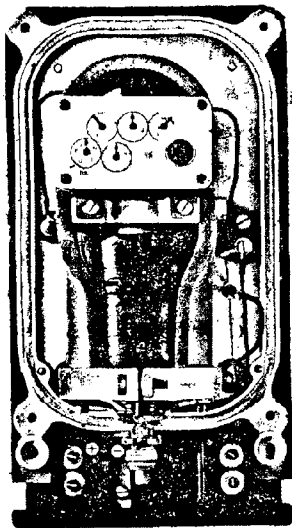


Fig. 33.

son bord supérieur par une bague en laiton, et dans sa partie inférieure par un disque en laiton formant le fond de la cloche (2).

L'induit est monté sur un axe qui engrène avec le mouvement d'horlogerie ; il porte un petit collecteur (diamètre extérieur 3 millimètres)

(1) On sait (voir fasc. 21 p. 5) que ces conditions sont nécessaires pour que l'aimant garde longtemps son magnétisme.

(2) Ce qui distingue surtout ce compteur d'une magnéto, c'est qu'ici le fer de l'induit est fixe, l'enroulement seul tourne. Ceci permet de diminuer le poids de la partie mobile, et aussi d'éviter les pertes par hystérésis et courants de Foucault. Nous verrons page 57 que, pour que le compteur O'K soit juste, il faut que l'induit ne fournisse aucune puissance.

formé de lames en or (hauteur d'une lame $5^{\text{mm}},5$). Deux balais, en forme d'étriers, amènent le courant à l'induit ; chaque balai touche le collecteur en deux points, ce qui permet d'avoir deux contacts sûrs, sans exagérer la pression des balais et, par conséquent, avec le minimum de frottement.

Le pivot de l'axe de l'induit, en acier dur, porte sur un saphir monté sur un ressort, ce qui donne une suspension élastique. Pour le transport de l'appareil la crapaudine peut être retournée ; dans cette position elle soutient l'axe sans toucher à la pointe du pivot.

Comme nous verrons dans la théorie, ce compteur est un *voltheuremètre*, c'est-à-dire que l'angle dont tourne l'induit est proportionnel à $\int u dt$, u étant la différence de potentiel aux bornes de l'induit. On en fait habituellement un *ampèreheuremètre*, en montant l'induit en dérivation sur un shunt parcouru par le courant du circuit d'utilisation. Ce shunt est en constantan pour les appareils de petit calibre, en manganin pour les calibres au-dessus de 15 ampères. Le shunt est intérieur à l'ap-

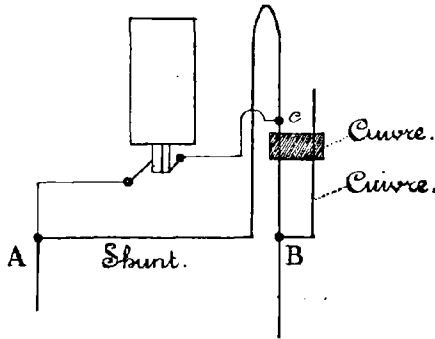


Fig. 34.

pareil jusqu'à 150 ampères, pour les compteurs d'abonné, et jusqu'à 30 ampères seulement, pour les appareils de tableau. Pour les calibres supérieurs, le shunt est extérieur et relié à l'induit par des cordons dont la résistance ne dépasse pas $0^{\text{ohm}},1$. La différence de potentiel maximum aux bornes du shunt est d'environ $0^{\text{volt}},5$.

Dans les appareils de calibres inférieurs à 15 ampères le shunt est ré-

glable, par le déplacement du point c et de la bague en cuivre C ⁽¹⁾ (fig. 34). Dans les calibres supérieurs le shunt est fixe, et le réglage de l'appareil se fait à l'aide d'un *shunt magnétique* monté sur l'inducteur. Ce shunt magnétique est formé de deux pièces en fer doux montées sur une bague (fig. 33) : en changeant la position des pièces en fer (par la rotation de la bague) on dérive une partie plus ou moins grande du flux inducteur, ce qui fait varier le champ dans l'entrefer.

Théorie. — On sait que la force contreélectromotrice d'un moteur magnétoélectrique est proportionnelle à la vitesse angulaire de l'induit :

$$e = k \cdot \omega,$$

Si l'induit tourne à vide et à vitesse uniforme, on a

$$e = u,$$

u étant la différence de potentiel aux bornes. On a donc

$$\omega = \frac{dx}{dt} = \frac{u}{k}$$

d'où, en intégrant :

$$(18) \quad \alpha = \frac{1}{k} \int_0^t u dt,$$

α étant l'angle dont a tourné l'induit pendant le temps t ; cet angle est donc proportionnel aux *voltheures*.

En réalité l'induit est monté sur un shunt de résistance R , parcouru par un courant I . On a donc $u = RI$, donc

$$\alpha = \frac{R}{k} \int_0^t I dt$$

et l'appareil constitue un *ampèreheuremètre*.

L'induit ne tourne pas tout à fait à vide (il produit une faible puissance perdue en frottement) et sa vitesse n'est pas uniforme, parce que la

(1) Cette bague, ainsi que le fil en cuivre f , servent à court-circuiter la portion du shunt non utilisée et à éviter ainsi les pertes inutiles d'énergie.

diff de pot. u varie constamment avec le courant I . Nous allons faire une théorie plus complète en tenant compte des conditions réelles de fonctionnement.

Soit i le courant qui passe dans l'induit on a,

$$(19) \quad i = \frac{u - e}{r},$$

r étant la résistance de l'induit ;

$$(20) \quad e = k\omega$$

et

$$d\left(\frac{1}{2}K\omega^2\right) = eiddt - fdx \quad \text{ou} \quad K\omega d\omega = eiddt - fdx$$

(d'après le théorème des force vives) K étant le moment d'inertie de l'induit et f le couple de frottement. On déduit de ces équations :

$$K \frac{d\omega}{dt} + \frac{k^2}{r} \omega + f = \frac{k}{r} u$$

ou

$$K \frac{d\omega}{dt} + \frac{k^2}{r} \frac{d\alpha}{dt} + f = \frac{k}{r} u \quad \left(\text{en posant } \omega = \frac{d\alpha}{dt}\right);$$

d'où en intégrant :

$$K(\omega - \omega_0) + \frac{k^2}{r} \alpha + \int_0^t f dt = \frac{k}{r} \int_0^t u dt.$$

Or ω et ω_0 sont deux quantités, dont les valeurs sont comprises entre o et un maximum (environ 5 tours par seconde pour les compteurs construits) tandis que α , $\int f dt$ et $\int u dt$, croissent toujours : il en résulte que, pour une valeur suffisamment grande du temps, le premier terme de l'équation précédente sera sûrement négligeable devant les autres et on aura :

$$(21) \quad \frac{k^2}{r} \alpha = \frac{k}{r} \int_0^t u dt - \int_0^t f dt$$

On serait arrivé au même résultat en supposant que le régime de vitesse s'établit à chaque instant instantanément. Cette remarque s'applique à tous les systèmes de compteurs.

Nous avons vu que l'induit est monté sur un shunt. Si i' est le courant qui traverse le shunt et I le courant dans le circuit d'utilisation, on a :

$$I = i + i' \quad \text{et} \quad i' = \frac{u}{R},$$

R étant la résistance du shunt. De ces relations et de (19) et (20) on tire :

$$u = \frac{Rr}{R+r} I + \frac{kr}{R+r} \cdot \frac{dx}{dt}.$$

En remplaçant dans (21) et en réduisant, on a :

$$(22) \quad \alpha = \frac{R}{k} \left[\int_0^t Idt - \frac{1}{k} \cdot \left(1 + \frac{r}{R} \right) \int_0^t f dt \right].$$

Cette formule nous montre que, si le terme contenant les frottements est négligeable, l'angle dont tourne l'induit est proportionnel à la quantité d'électricité qui a traversé le circuit. Si le couple de frottement n'est pas négligeable, on peut réduire son influence en *augmentant k et en réduisant r* . Or k est proportionnel au flux dans l'entrefer et aux nombre de spires de l'induit. Il en résulte que, *dans un compteur genre O'K, le champ dans l'entrefer et la surface de celui-ci doivent être grands, et on doit avoir un grand nombre de spires sur l'induit; par contre la résistance de l'induit devra être faible, donc on ne mettra aucune résistance en série.*

Remarque. — Le compteur O'K peut servir comme compteur d'énergie sur les distributions à potentiel constant. On a en effet dans ce cas :

$W = U \int Idt$, W étant l'énergie consommée et U la diff. de pot. constante. Chaque appareil étant construit pour une tension déterminée pourra être gradué directement en unités d'énergie.

Compensation des frottements. — Pour les compteurs de calibres inférieurs à 15 ampères, on se contente de réduire les frottements au minimum. Pour les calibres de 15 ampères et au-dessus, on compense, le couple de frottement qui reste, en faisant passer dans l'induit, dans le

sens convenable, un courant supplémentaire, pratiquement constant, pris sur la diff. de pot. de l'installation. Ce courant est de l'ordre de $0^{\text{amp.}},01$.

Réglage du compteur O'K. — Aux grands débits le réglage des calibres inférieurs à 15 ampères se fait par la variation de la résistance du shunt (voir page 56); pour les calibres supérieurs par le shunt magnétique.

Aux petits débits il n'y a pas de réglage pour les compteurs non compoundés; on vérifie seulement que leur approximation se trouve dans les limites imposées. Pour les compteurs compoundés, après avoir vérifié que tout est en bon état, on règle la marche à faible charge (par ex. $1/20$ de la charge maximum) en agissant sur le compoundage.

Avantages et inconvénients. — Les compteurs pour faibles débits ont l'avantage de ne pas consommer à vide (n'ayant pas de fil « volt ») pour les appareils compoundés la consommation est faible (1 watt pour 100 volts).

Ces compteurs sont peu influencés par les champs magnétiques extérieurs, leur champ propre étant très grand. Ils ne sont pas influencés par la variation de la température; en effet dans le terme principal de la formule (22) n'entre que la résistance R du shunt qui est en constantan ou en manganin.

Le principal inconvénient du compteur O'K provient du collecteur et des balais: les résistances de contacts doivent être très faibles; les frottements sont difficiles à réduire. De plus l'entretien des balais et du collecteur est délicat.

Employés comme wattheuremètres, ils ne sont exacts qu'autant que l'usine centrale maintient constante la diff. de pot.

On construit des compteurs pour distribution à 2 fils et à 3 fils; des compteurs spéciaux: pour tramways (avec suspension élastique), pour charge et décharge des accumulateurs etc, et des compteurs dans lesquels on corrige l'erreur provenant de la variation de la tension.

Compteurs électromagnétiques amortis. — Ces appareils sont de

petits moteurs magnétos qui produisent un travail extérieur proportionnel au carré de la vitesse (au lieu de tourner à vide). On aura donc un couple amortisseur proportionnel à la vitesse ($A\omega$).

Pour cela un cylindre ou un disque, en cuivre ou en aluminium, se déplace entre les pôles d'un aimant (en général cette pièce sert de support ou d'enveloppe pour l'enroulement induit, et l'aimant est celui des inducteurs) : on sait qu'il se produit alors des courants de Foucault et l'énergie perdue dans ces courants, est proportionnelle au carré de la vitesse.

Pour obtenir la formule de ces appareils il suffit de remplacer dans la formule (22) le couple de frottement f par le couple total $A\omega + f$, et on obtient :

$$\alpha = \frac{R}{k} \left[\int_0^t I dt - \frac{1}{k} \left(1 + \frac{r}{R} \right) \left(\int_0^t [A \omega + f] dt \right) \right]$$

d'où, en faisant passer dans le premier membre tout ce qui contient α et en réduisant, on a :

$$(23) \quad \alpha = \frac{R}{k} \cdot \frac{1}{1 + \frac{A(R+r)}{k^2}} \cdot \left[\int_0^t I dt - \frac{1}{k} \left(1 + \frac{r}{R} \right) \int_0^t f dt \right].$$

Cette formule nous montre, que les conditions nécessaires pour que l'influence du couple de frottement soit négligeable sont les mêmes que pour le compteurs O'K ; mais ces conditions sont plus difficiles à remplir parce qu'on est amené, dans ces appareils, à rendre r beaucoup plus grand, pour que le courant dans l'induit ne soit pas trop fort. D'autre part ces appareils dépendent de la température, le coefficient A dépendant de la résistance du disque ou du cylindre amortisseur.

Compteur de la Société Française d'Électricité AEG type E. (fig. 35).

— L'inducteur se compose d'un aimant permanent vissé sur le socle par sa zone neutre (les pôles se trouvant ainsi loin du socle, celui-ci peut être en fer) et muni de pièces polaires. Entre les pièces polaires se trouve un cylindre en fer doux, fixe aussi.

L'induit est formé de trois bobines de forme spéciale, montées sur une cloche en cuivre ou en aluminium qui sert à produire le couple d'amortissement (1) ; le collecteur contient 3 lamelles en argent.

Le pivot inférieur joue dans une crapaudine spéciale qui se retrouve

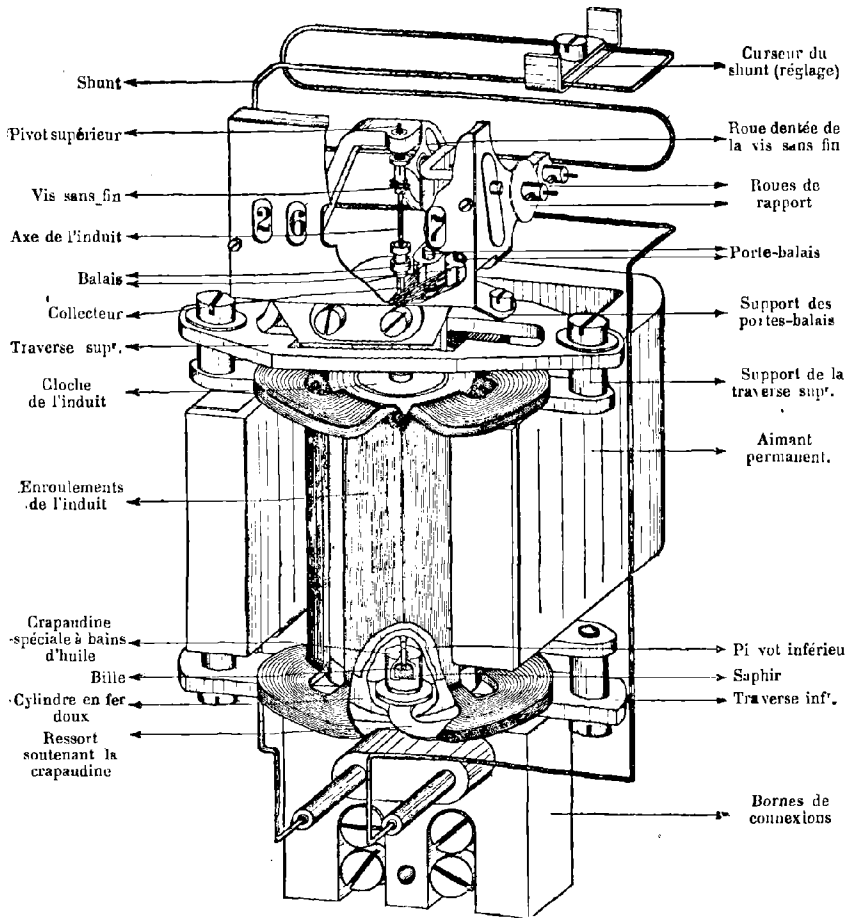


Fig. 35.

dans tous les compteurs A. E. G. L'axe de l'induit se termine par une petite cavité (fig. 36) dans laquelle se loge une bille de 0^{mm},7 de dia-

(1) Les parties supérieures et inférieures des bobines utilisent les flux de dispersion.

mètre en acier trempé ; cette bille appuie sur un saphir, le tout étant noyé dans un bain d'huile.

Ce compteur présente deux particularités intéressantes :

1° Les balais ont, sur le collecteur des positions variables avec le courant qui traverse l'induit. Pour cela les deux balais sont montés à l'une des extrémités d'un levier monté sur pivot, à l'autre extrémité duquel se trouve une bobine, parcourue par le même courant que l'induit, et qui se déplace dans le champ de l'aimant (fig. 37). Si le courant de l'induit varie — par exemple à cause d'une modification de la résistance de

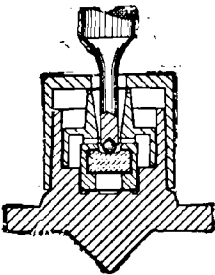


Fig. 36.

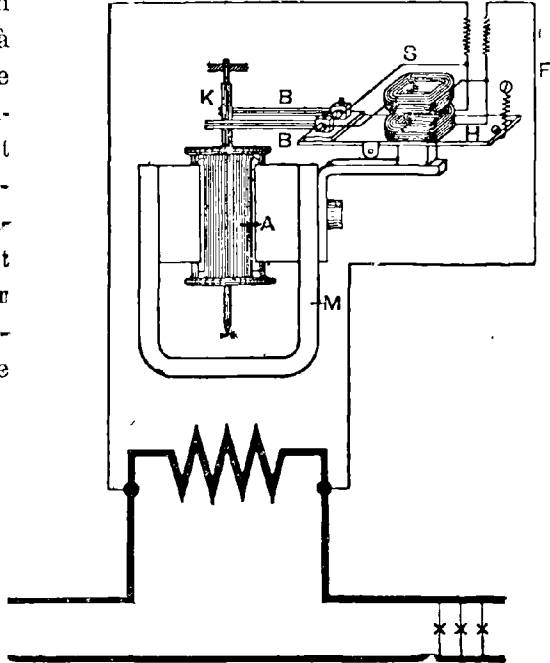


Fig. 37.

contact — la position des balais varie et les balais se déplacent jusqu'à ce que le courant reprenne une valeur normale. Ceci permet d'éliminer, en partie au moins, les erreurs provenant des contacts des balais. De même à chaque valeur du courant extérieur correspond une position différente des balais — et l'usure est donc moindre.

2° Une autre particularité intéressante est, qu'on peut donner aux lamelles du collecteurs une forme en spirale de façon que le couple actif varie avec la position des balais — et on peut ainsi compenser le couple de frottements.

Le couple actif maximum est d'environ 10 gr. cm. ; la chute de tension

aux bornes du shunt : 1 volt. Le compteur démarre au $\frac{1}{200}$ de sa charge.

Le réglage se fait par la variation de la résistance du shunt.

Compteur Aron. (fig. 38). — L'équipage mobile a la forme d'un disque : trois bobines plates sont enfermées dans une boîte en aluminium, de forme très aplatie, et tourne entre les pôles de deux aimants

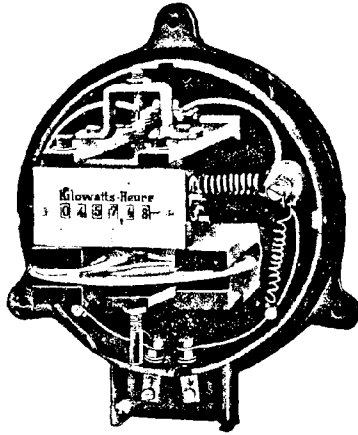


Fig. 38.

permanents. La résistance de chaque bobine de l'induit est d'environ 60 ohms (fil de cuivre diamètre $\frac{1}{10}$ de millimètre); le collecteur contient 3 lamelles en alliage argent-or. Les balais sont en argent-or.

Poids de l'équipage 52 grammes environ. Le shunt est en constantan. Sa résistance est réglable à l'aide de deux curseurs.

Compteurs à mercure. — Ces appareils — employés surtout en Angleterre — sont de petits *moteurs unipolaires* analogues à la roue de Barlow. La partie mobile se compose d'un disque ou cylindre en cuivre, qui se déplace dans une cavité remplie en grande partie de mercure, entre les pôles d'un aimant permanent de forme appropriée. Le courant est amené par des pièces fixes qui touchent le mercure en deux points appropriés. Du mercure le courant passe dans la partie mobile et on s'ar-

range pour que sa direction moyenne soit radiale dans le disque et suivant une génératrice dans le cylindre ⁽¹⁾. L'emploi du mercure diminue les frottements (autrement on serait forcé d'amener le courant par des balais), mais ceux-ci croient avec la vitesse, et on est forcé de les compenser pour les fortes charges.

Ces appareils sont freinés. Le couple actif est, comme dans la roue de Barlow, proportionnel au courant. Le couple d'amortissement provient de l'action de l'aimant permanent sur les courants de Foucault créés dans la partie mobile ; il est proportionnel à la vitesse. La théorie est la même que celle des compteurs freinés à collecteur.

Pour les petits calibres tout le courant passe dans la partie mobile ; pour les calibres supérieurs (par exemple au dessus de 100 ampères) on emploie des shunts. Nous citerons, comme exemples, les compteurs de *Chamberlain et Hookhan Ltd.* (Birmingham) et le compteur *Ferranti Ltd* (Lancashir).

Quelques données numériques sur les compteurs magnétoélectriques :

TABLEAU I.
Compteurs magnétoélectriques. Calibre 10 ampères

Type	Coûts (grammes cent.)	Poids de l'équipage (grammes)	Vitesse pour charge maxima (tours par heure)	Diff. de pot. aux bornes du shunt (volts)	Induit		Collecteur	
					Nombre de spires	Rés. entre balais	Diamètre en m.m.	Nombre de lames
Non amorti O'K . .	environ 30	environ 214	environ 15 000	environ 0,5	environ 400	oh. env. 2,5	environ 3	3
Amorti AEG. . . .	10	—	9 600	1	380	25	3	3
Amorti Aron . . .	—	—	8 000	1	—	45	3	3

COMPTEURS DYNAMOÉLECTRIQUES

Compteurs à collecteurs (genre Elihu Thomson). — Ces compteurs sont de petits moteurs dynamoélectriques, en général sans fer. L'induit,

(1) Il suffit pour cela, par exemple pour le cylindre, de vernir toute la surface excepté les bords, le courant passe alors d'un bord à l'autre en suivant les génératrices.

enroulé en tambour ou en disque, tourne autour d'un axe vertical et entraîne, à l'aide d'une vis sans fin, un mouvement d'horlogerie ; il est monté (en série avec une grande résistance) sur la différence de potentiel du circuit d'utilisation. L'inducteur, bipolaire, est en général formé de deux bobines parcourues par le courant principal (fig. 39). Sur le

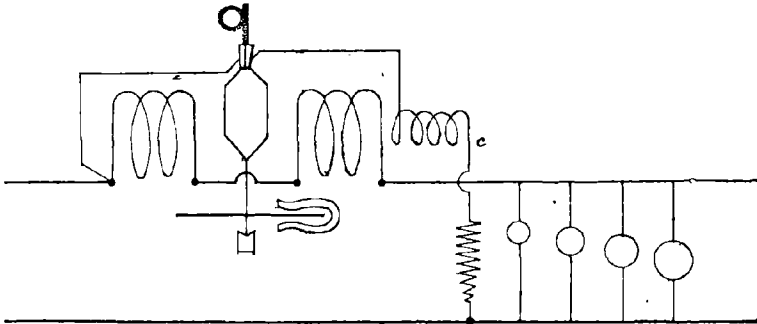


Fig. 39.

même arbre que l'induit se trouve un disque ou un cylindre, en cuivre ou en aluminium, qui tourne entre les pôles d'aimants permanents ⁽¹⁾.

Couples actifs ou moteurs. — Supposons qu'on ait à faire à un circuit à courant continu. On sait que le couple moteur C_m est proportionnel au produit Φi , Φ étant le flux inducteur et i le courant dans l'induit ⁽²⁾. L'inducteur ne contenant pas de fer, Φ est proportionnel au courant d'excitation I , qui est le courant principal. On a donc

$$(24) \quad C_m = A \cdot Ii,$$

mais

$$i = \frac{U - E}{r}.$$

U étant la différence de potentiel aux bornes du circuit d'utilisation, E la force contreélectromotrice de l'induit, r la résistance totale du circuit à fil fin. Dans ces compteurs, on s'arrange pour que E

⁽¹⁾ Ces aimants doivent être assez éloignés du moteur proprement dit pour ne pas produire un flux supplémentaire à travers les bobines de l'induit, et pour qu'un courant trop fort dans l'inducteur ne change pas leur aimantation.

⁽²⁾ Voir : JANET. — *Leçons d'électrotechnique Générale*, Tome I, page 336, (E I. III).

soit négligeable devant U , on a donc $i = \frac{U}{r}$, et en remplaçant dans (24) on obtient :

$$(25) \quad C_m = \frac{A}{r} \cdot UI = \frac{A}{r} \cdot P.$$

P étant la puissance du circuit d'utilisation.

Couple antagoniste. — Ce couple C_a se compose, d'une partie constante f provenant des frottements et d'un couple provenant des courants de Foucault induits dans le disque ou cylindre métallique, couple proportionnel à la vitesse angulaire ω et inversement proportionnel à la résistance r' que le disque oppose à ces courants,

On a donc :

$$(26) \quad C_a = \frac{B}{r'} \omega + f.$$

Si le mouvement de l'induit est uniforme, on aura

$$C_m = C_a \quad (1),$$

ou

$$\frac{A}{r} P = \frac{B}{r'} \omega + f,$$

d'où

$$(27) \quad P = \frac{B}{A} \cdot \frac{r}{r'} \omega + \frac{r}{A} \cdot f = 2\pi \frac{B}{A} \frac{r}{r'} \cdot \frac{dn}{dt} + \frac{r}{A} \cdot f,$$

$\frac{dn}{dt}$ étant la vitesse angulaire exprimée en tours par seconde (2).

Si on néglige les frottements ou qu'on les suppose compensés par un couple actif supplémentaire (3), on aura :

$$(28) \quad P = p \cdot \frac{dn}{dt},$$

(1) Nous avons vu, page 53, que pratiquement on n'a pas à se préoccuper de l'inertie du disque, l'égalité $C_a = C_m$ donne donc des résultats vrais, même si le mouvement n'est pas uniforme.

(2) On a en effet $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$ et $\alpha = 2\pi \cdot n$, d'où $\omega = 2\pi \frac{dn}{dt}$.

(3) Voir page suivante.

(en posant $p = 2\pi \frac{B}{A} \cdot \frac{r}{r'}$); ou encore

$$(28') \quad P = 3600 \cdot K \cdot \frac{dn}{dt},$$

(en posant $p = 3600 K$).

Les constantes p ou k sont données par les constructeurs sous le nom de *constante* de l'appareil (1).

Des formules (28) et (28') on déduit :

$$W = \int P dt = p \cdot n$$

ou

$$\left(\frac{W}{3600} \right) = K \cdot n.$$

W étant l'énergie consommée dans le circuit d'utilisation ; cette énergie est donc proportionnelle au nombre de tours de l'équipage mobile.

Réduction et compensation des frottements. — Dans tous les types de compteurs on cherche à réduire au minimum le couple de frottement, qui tend à fausser les résultats, surtout aux faibles charges. Pour cela on réduit le plus possible le poids de l'équipage mobile, on soigne particulièrement les pivots et on emploie des mouvements d'horlogerie qui demandent un très faible effort.

Il reste pourtant, dans les compteurs à collecteur, des frottements particulièrement gênants : ce sont les frottements des balais sur le collecteur. Pour les réduire on diminue le diamètre du collecteur, on fait ses lamelles, ainsi que les balais, en argent, on donne à ceux-ci des formes appropriées pour avoir le meilleur contact avec le moindre frottement, on leur donne même un certain mouvement pour qu'ils ne touchent pas toujours aux mêmes points. On a cherché aussi à éviter les étincelles au contact (qui donnent aux lames une forme dentelée capable d'augmenter les frottements) en réduisant la tension entre deux lames (à environ 2 volts) et la chute de tension au passage d'une lame à un balai (env. 0,3

(1) Voir page 54.

volts). On a réduit la pression des balais, mais on ne peut pas descendre au-dessous d'un minimum (0,6 à 1 gramme par balai environ) parce qu'on risque d'avoir des étincelles. Malgré toutes les précautions, le couple de frottement aux balais est encore 10 à 15 fois plus grand que celui de toutes les autres parties — et on est forcé de le *compenser*. Pour cela on ajoute à l'inducteur un certain nombre de spires (*c*, fig. 39) parcourues par le même courant que l'induit. L'action de ces spires sur l'induit donne un couple moteur supplémentaire c_m proportionnel à i^2 , d'après la formule (24), donc à U^2 .

La diff. de pot. U étant presque constante, ce *couple compensateur* est presque constant et peut annuler l'effet du couple de frottement.

La compensation n'est pas parfaite, parce que c_m n'est pas tout à fait constant (U ne l'étant pas), et que le couple de frottement f varie aussi. Il dépend de la propreté du collecteur, il est influencé par les vibrations, etc.

Si c_m prédomine, le compteur pourrait marcher à vide (c'est-à-dire sur les volts seuls) et avancer pour les faibles charges ; si c_m est trop faible, il en résulterait un courant de démarrage trop fort et un retard de l'appareil à faible charge.

En général on s'arrange pour que le compteur démarre au $1/200$ de la charge maxima, et on empêche — au besoin — la marche à vide à l'aide d'artifices particuliers (v. à la description des compteurs).

Influence de la température. — Il résulte de la formule (27), que le fonctionnement du compteur dépend du rapport des résistances du disque et du circuit à fil fin. Pour que les indications de l'appareil ne dépendent pas de la température il suffit que $\frac{r}{r'}$ n'en dépende pas. Or, on a $\frac{r}{r'} = \frac{r_0(1 + \alpha t)}{r'_0(1 + \alpha' t')}$ (r_0 et r'_0 étant les valeurs de r et de r' à 0° , α et α' leurs coefficients de température, et t et t' leurs températures).

Pour que $\frac{r}{r'}$ reste constant, il suffit de s'arranger pour avoir $t = t'$ et $\alpha = \alpha'$. Or, t et t' dépendent de la température ambiante, qui est à peu près la même pour le disque et pour le fil fin, et de l'échauffement des conducteurs par le courant. Il convient donc de rendre négligeable

l'échauffement par le courant, et de donner au fil fin et au disque le même coefficient de température.

Le disque étant en cuivre ou en aluminium, on fait quelquefois le fil fin, partie en manganin, partie en nickel, les proportions étant choisies de façon que le coef. de temp. soit le même que celui du disque.

Emploi du fer. — On n'emploie pas, en général, le fer dans ces appareils parce que le flux dans l'inducteur ne serait plus proportionnel au courant et surtout parce que, à cause de l'hystérésis, à chaque valeur du courant inducteur ne correspondrait pas une valeur déterminée du flux — d'où erreur.

Réglage de l'amortissement. — On règle la valeur du couple d'amortissement en changeant la position des aimants par rapport au disque ou au cylindre.

Emploi des compteurs genre Thomson en courant alternatif. — Le compteur Thomson peut être considéré comme un wattmètre électrodynamique, dans lequel on remplace le couple antagoniste proportionnel à l'angle de rotation (couple de torsion) par un couple proportionnel à la vitesse angulaire (couple d'amortissement), et dans lequel l'artifice du collecteur permet à l'équipage mobile de prendre un mouvement de rotation continu.

Cet appareil pourra donc — comme le wattmètre — être employé en courant alternatif. On aura — comme pour les wattmètres — à corriger l'effet de la self-induction de l'équipage mobile. Cette self-induction est beaucoup plus grande dans le compteur, et d'autre part celui-ci devant indiquer l'énergie — sans qu'on ait à faire aucun calcul — la correction devra se faire automatiquement⁽¹⁾.

L'artifice le plus employé est celui de Frager. Il consiste à introduire dans l'intérieur une bague en court-circuit⁽²⁾ qui joue le rôle du secon-

(1) Le compteur Thomson est actuellement très peu employé en courant alternatif.

(2) On enroule en général sur cette bague le circuit de compensation des frottements. Des artifices analogues sont très employés dans les compteurs d'induction.

naire d'un transformateur. Le flux qui agit sur l'induit est alors le flux résultant du primaire et du secondaire. Ce flux est décalé en arrière par rapport au courant primaire⁽¹⁾. En réglant la résistance et la position de la bague on peut rendre — pour une fréquence donnée — ce décalage égal à celui introduit par la self-induction du fil fin.

Avantages et inconvénients des compteurs Thomson. — Par rapport aux compteurs pendulaires et oscillants, ils ont l'avantage de la simplicité de construction ; leurs inconvénients proviennent surtout de l'emploi du collecteur.

Par rapport aux compteurs magnéto-électriques ils ont l'avantage de mesurer directement l'énergie et d'être exacts même si la différence de potentiel diffère beaucoup de la valeur normale. Ils ont l'inconvénient de consommer de l'énergie (dans le fil fin) même si le courant dans le circuit d'utilisation est nul et, pour la plupart d'entre eux, d'être influencés par les champs magnétiques extérieurs.

DESCRIPTION DE QUELQUES APPAREILS

Compteurs de la Compagnie pour la fabrication des compteurs. —

1° *Type A'* (fig. 40). L'induit enroulé en tambour est à la partie inférieure ; le disque amortisseur, en cuivre, au-dessus. Les balais sont en forme d'étrier (fig. 40). On a ainsi deux contacts sûrs par balai. L'amortissement est réglable par le déplacement des aimants (en nombre de deux). Pour les données numériques voir tableau page 77.

2° *Type B* (fig. 41). C'est un compteur astatique. L'induit est en forme de disque. Il est formé de 6 bobines, dont les spires, en cuivre isolé à la soie, ont la forme d'un demi-cercle fermé par un diamètre (fig. 42) ; les parties utiles sont les diamètres.

Les inducteurs, en nombre de deux, sont à axes verticaux, et enroulés

J. V. T. Op. cit. Tome II. Chap. Transformateurs.

de façon que les pôles qui regardent l'induit soient de noms contraires⁽¹⁾.
Les balais sont formés de trois en argent (on a ainsi trois contacts

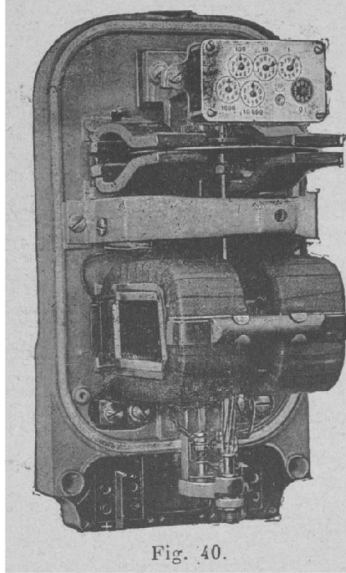


Fig. 40.

sûrs par balai). On peut les retirer et les remettre en place sans chan-

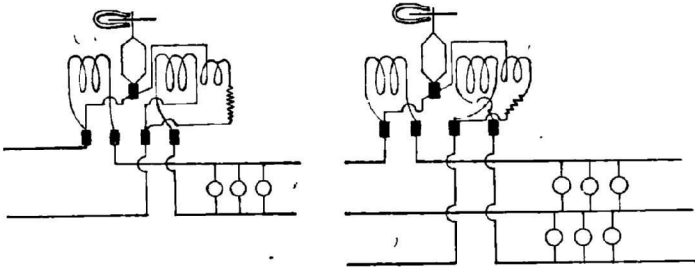


Fig. 40 bis.

a) Schéma du montage d'un compteur à 2 fils.

b) Schéma du montage d'un compteur à 3 fils.

(1) Il est facile de voir que le compteur est astatique. On voit (fig. 42) que le courant a le même sens dans les deux rayons du diamètre d'une spire. L'action du champ terrestre donne sur les deux rayons deux forces égales, parallèles et de même signe, dont l'action est annulée par la réaction de l'axe de rotation. — Par contre par rapport à l'inducteur l'un des rayons se trouve sous un pôle N tandis que l'autre se trouve sous un pôle S: les actions de ces deux pôles donnent deux forces égales, parallèles, et de signes contraires, qui forment un couple. L'ensemble des couples agissant sur les diverses spires sont concordants et donnent le couple actif.

ger leur pression sur le collecteur. La bobine de compensation⁽¹⁾ (compoundage) est aussi à axe vertical et réglable en hauteur.

Le disque amortisseur se trouve à la partie supérieure ; il est en alu-

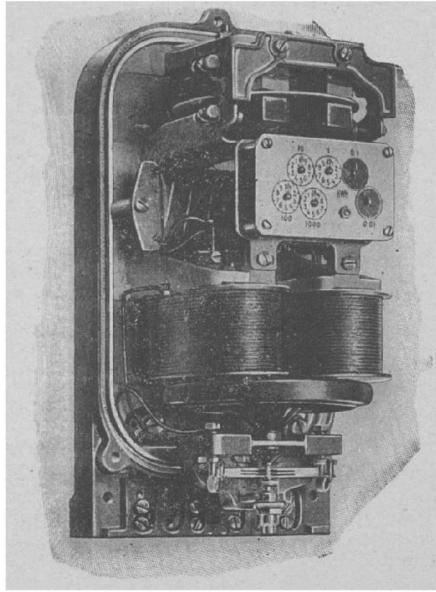


Fig. 41.

minium et se déplace dans l'entrefer de deux aimants fixes, dont le champ est réglable à l'aide d'un shunt magnétique⁽²⁾. Ce shunt se compose d'une plaque en fer doux dans laquelle se trouvent deux vis en fer doux, une devant chaque pôle de l'aimant ; en rapprochant plus ou

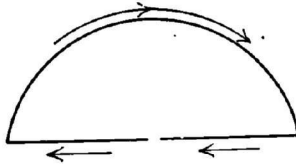


Fig. 42.

moins les têtes de ces vis des pôles, on fait varier la dispersion magnétique.

(1) Vue à gauche et au-dessus des inducteurs.

(2) Un des shunts est vu à gauche et en haut de la figure.

L'ensemble de l'équipage mobile est plus léger que celui du type A' (voir tableau page 77). La suspension de l'équipage mobile est semblable à celle du compteur O'K.

Les compteurs A' et B sont construits pour circuits à 2, 3 ou 5 fils. Pour les compteurs à 3 fils chacun des inducteurs est parcouru par l'un des courants principaux, et le fil fin se trouve monté entre les fils extrêmes de la ligne (fig. 40^b).

Compteur Vulcain (fig. 43) (1). — Ce compteur diffère des précédents par certains détails de construction et surtout parce que le disque amortisseur est remplacé par un *cylindre* en cuivre se déplaçant entre les pôles de quatre aimants permanents verticaux. On règle l'amortissement en changeant la position du cylindre par rapport aux aimants.

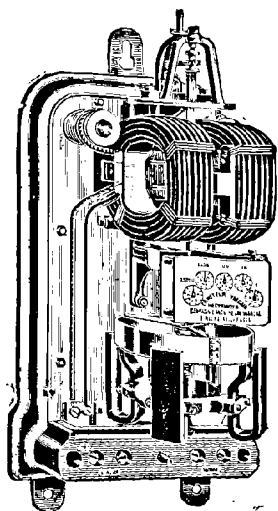


Fig. 43.

L'induit est enroulé en tambour; le collecteur et les balais sont à la partie supérieure. La résistance additionnelle à l'induit est en constant. Les balais sont en fil d'argent juxtaposés et soudés à une lame de clinquant très flexible.

Pour empêcher la marche à vide, un petit cavalier en fer doux est placé à cheval sur le cylindre amortisseur : lorsque l'inducteur n'est traversé par aucun courant, ce cavalier se place entre deux aimants et empêche l'équipage de

tourner.

Le support de l'équipage mobile se fait par une suspension élastique (2). Pour le transport on peut soulever et caler l'équipage mobile. Il faut que, lorsque l'équipage est libéré, il reprenne toujours la même position. Pour cela (fig. 44) (cette figure représente le support de la pierre, monté sur ressort, et le dispositif de calage) la pièce *aa* qui porte la crapaudine

(1) Construit par la C^{ie} Anonyme Continentale pour la fabrication des compteurs.

(2) C'est l'un des premiers appareils auxquels on a appliqué la suspension élastique.

est fixée invariablement à l'aide de la vis V. La pièce *mm* peut au contraire être montée ou descendue, en la vissant ou en la dévissant par la rotation de la tête moletée *m*. En soulevant *m* son bord supérieur *nn* vient toucher contre la partie conique *t* de l'arbre de l'équipage et le soulève

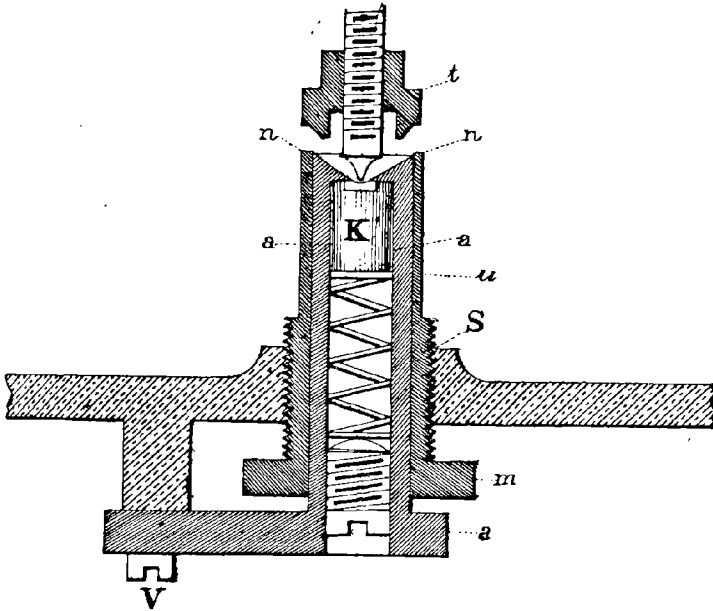


Fig. 44.

de plusieurs millimètres. C'est dans cette position que se fait le transport. Une fois l'appareil monté on dévisse doucement *m* et la pointe du pivot appuie sur la pierre.

Compteurs de la Société Française d'électricité A. E. G. — Ce compteur diffère du Thomson type A' par des détails de construction. Le disque amortisseur est en aluminium et se trouve à la partie inférieure.

On règle l'amortissement en faisant tourner l'aimant autour d'un axe vertical, ce qui peut se faire à l'aide d'un tournevis. Le collecteur a 8 lamelles en argent. Les balais sont en fils d'argent *a* pressés par un fil *b* faisant ressort (fig. 45). La suspension est à bille, comme dans tous les appareils A. E. G actuels (voir fig. 36).

L'ensemble de l'appareil est monté sur un cadre facilement démontable et qui permet de voir toutes les parties sans avoir à les démonter.

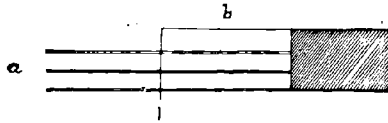


Fig. 45.

Compteur Lux (1). — Ce compteur est caractérisé par la forme de son induit, qui se compose de trois bobines plates, circulaires ou ovales, dont les axes font entre eux des angles de 120° ; l'une des extrémités de chaque bobine est réunie à une lame du collecteur, les extrémités qui restent étant soudées ensemble : on obtient ainsi un enroulement ouvert. Deux balais frottent sur le collecteur.

Ce dispositif a l'avantage de donner le même couple avec un poids de cuivre moindre, environ $\frac{6}{10}$ de celui d'un enroulement fermé ; d'autre part, le petit nombre de lames au collecteur permet de rendre celui-ci très petit et de réduire ainsi les frottements. Mais l'enroulement étant ouvert et le nombre de lames faibles, les étincelles au collecteur, qui sont très nuisibles, se produisent plus facilement et il faut prendre des précautions pour les éviter.

Compteurs électrodynamiques à mercure (wattheuremètres). — Ces compteurs diffèrent des *ampèreheuremètres* à mercure, surtout par leur inducteur, qui est un électro-aimant dont le fil est monté sur la diff. de pot. du circuit. La diff. de pot. variant peu, l'exactitude de ces appareils est pratiquement suffisante malgré que le flux créé par l'inducteur n'est pas proportionnel au voltage.

(1) Construit par Isaria Zöhler Werke (Munich).

TABLEAU II
Compteurs dynamoélectriques
Calibre : 10 ampères, 110 volts

Type	Couple moteur (gr. em.)	Poids (grammes)	Constante	Inducteurs		Induit		
				At. max.	Cons. max. (watts)	Nombre de spires	Rés. entre balais (ohms)	Rés. auid. (ohms)
	environ	environ	environ	environ	environ	environ	environ	environ
Thomson A' . .	11	260	$K=0,35^{(1)}$	1 200	0,8	8 000	600	3 000
id. B . .	8	150	$K=0,25^{(2)}$	1 600	1,0	6 009	1 100	4 000
Vulcain . . .	9,5	215	$p=1000^{(1)}$	1 200	0,7	6 400	600	5 000
Thomson AEG .	6,5	125	$K=0,25^{(1)}$	1 300	—	8 000	700	7 000

Type	Induit Métal de la rés. addit.	Collecteur		Amortisseur				Entrefer des aimants		Bobine compensatrice Nombre de spires	
		Diamètre mm.	N. de lames	Forme	Métal	Diam. mm.	Epais. mm.	Haut. mm.	Sect. mm ²		Epais. mm.
Thomson A'	Constantan { 50 % nickel 50 % mail.	env.									
Thomson B		6	8	Disque	Cuivre	105	1	—	32 × 36	3	2 000
Vulcain . . .	— nickel	5	8	Cylin.	Cuivre	100	1	10	20 × 20	3,5	—
Thoms AEG.		—	8	Disque	Allum.	112	1	—	—	—	6 000

COMPTEURS D'INDUCTION OU A CHAMP TOURNANT ⁽²⁾

Ces compteurs sont de petits *moteurs asynchrones*. Dans presque tous les compteurs modernes l'équipage mobile (*rotor*) est formé d'un

(1) Voir page 54.

(2) Voir aussi : ILIOWICZ : Sur la théorie des Compteurs d'induction à disque (*La Lumière Electrique*, nos 6 et 7 des 11 et 18 février 1914). — Ces compteurs ne fonctionnent qu'avec du courant alternatif. Nous ne nous occuperons ici que des compteurs mono-phasés ; les compteurs pour circuits polyphasés, dont nous parlerons plus tard, dérivent de ceux-ci.

disque en cuivre ou en aluminium, tournant autour d'un axe vertical, dans l'entrefer d'un aimant permanent et d'un ou de plusieurs électro-aimants (*stator*). Les bobines de ces électro-aimants sont parcourues, les unes b_1 par le courant principal (quelquefois par une dérivation de celle-ci), les autres b_2 — en fil fins — montées entre les bornes du circuit d'utilisation, par un courant fonction de la diff. de pot. entre ces

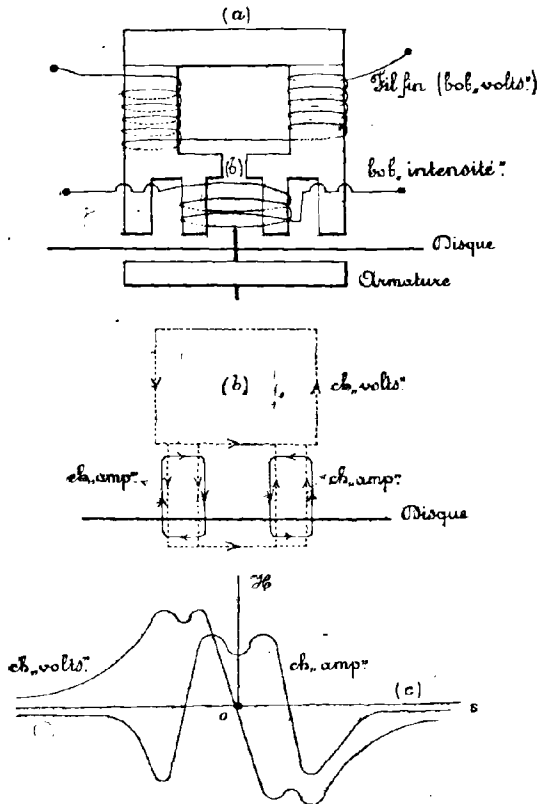


Fig. 46.

bornes. Ces compteurs contiennent, en outre, des bobines ou des spires en court circuit (ou des systèmes équivalents).

Principe. — Les champs alternatifs créés par le stator induisent, dans le disque des courants de Foucault. Lorsque le disque est au repos,

chacun des champs agit sur les courants créés par les autres champs (et quelquefois même sur ses propres courants induits) et de l'ensemble de ces actions résulte un *couple actif*, qu'on s'arrange à rendre *proportionnel à la puissance à mesurer*.

Lorsque le disque tourne, le couple actif reste le même, mais, par la

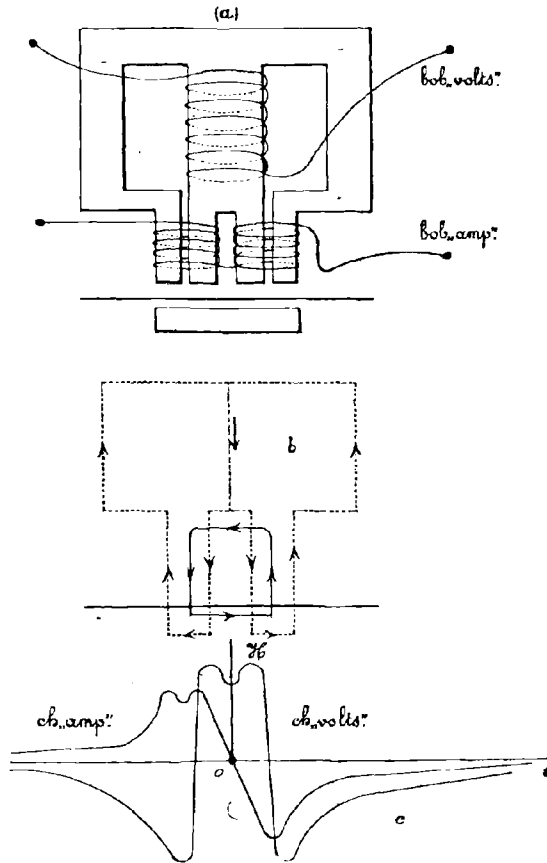


Fig. 47.

rotation du disque dans le champ — non uniforme — des électro-aimants ou des aimants permanents, il s'induit d'autres courants de Foucault ; les actions des champs sur ces courants tendent à freiner le disque et donnent un *couple antagoniste proportionnel à la vitesse de rotation*.

A ces couples s'ajoutent des *couples parasites* provenant surtout des frottements, et des *couples compensateurs* ; ces deux groupes de couples n'interviennent pratiquement qu'aux faibles puissances.

Avant de faire la théorie de ces appareils nous allons indiquer la ré-

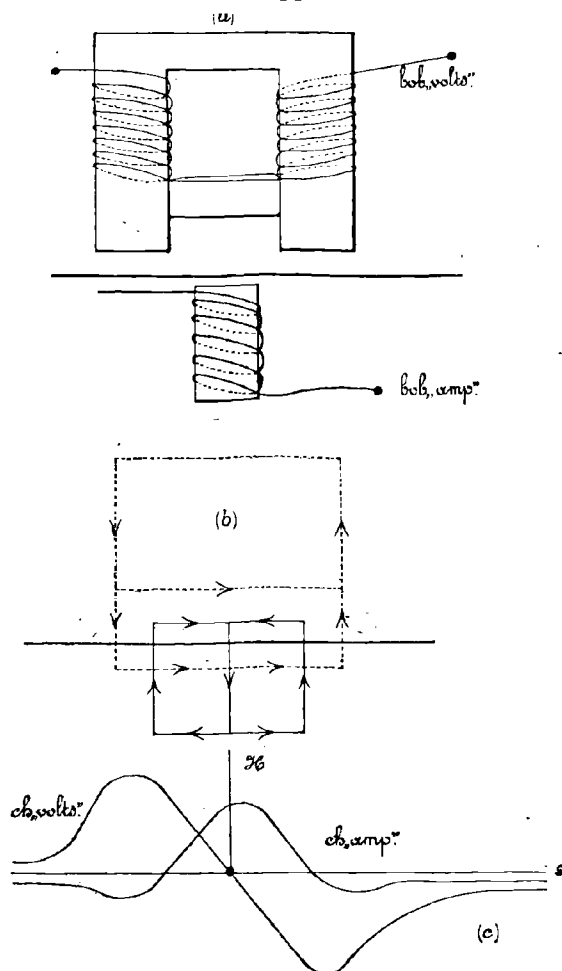


Fig. 48.

partition — à un instant donné — des champs dans les entrefers des électro-aimants pour trois types de compteurs, les plus répandus (fig. 46, 47 et 48).

La figure 46 *a*, représente les schémas de l'électro-aimant, avec son armature, et du disque d'un compteur « BT » ; les figures 47 *a*, et 48 *a*, les mêmes éléments, respectivement, d'un compteur ACT 3 et d'un compteur « Cosinus » type M. R. — Les figures 46 *b*, 47 *b*, et 48 *b* indiquent les tracés approchés des lignes de forces moyennes dans les électro-aimants et leurs entrefers ; enfin les figures 46 *c*, 47 *c*, et 48 *c* ⁽¹⁾ sont les courbes représentatives de la répartition approximative du champ utile dans l'entrefers le long d'une circonférence du disque, en fonction de l'arc de circonférence.

Remarquons que le disque étant horizontal et tournant autour d'un axe vertical, les composantes utiles des champs sont leurs composantes verticales.

En chaque point du disque se trouve un champ créé par chaque groupe de bobines. Les courants de Foucault induits dans le disque produisent aussi des champs magnétiques, qui se combinent aux précédents ; il en est de même des champs produits par les courants induits dans les bagues, les plaques ou les bobines en court circuit, qu'on emploie, comme nous le verrons, dans la plupart des compteurs. Ces champs, produits par les courants induits, ont leurs valeurs maxima pratiquement proportionnelles aux champs produits par les bobines et ils se combinent avec ceux-ci pour donner, en définitive, en chaque point du disque, deux champs résultants, l'un h_1 proportionnel au courant principal I , et l'autre h_2 proportionnel au courant i dans les bobines à fil fin, ce dernier étant, dans les limites de la pratique, proportionnel à la diff. de pot. U du circuit d'utilisation.

Posons

$$U = U_{\text{eff}} \cdot \sin \omega t \quad \text{et} \quad I = I_{\text{eff}} \cdot \sin (\omega t - \varphi),$$

(¹) Les courbes figure 46 *c* et figure 48 *c*, ont les mêmes allures et la même position relative. On obtiendra les mêmes courbes pour tous les compteurs ayant une bobine centrale parcouru par le courant et deux bobines « volts » latérales, par exemple : pour les compteurs AEG, H et B, Aron. La figure 47 *c*, sera obtenue pour tous les compteurs ayant une bobine « volts » et deux bobines « ampères ». Par exemple : les compteurs Westinghouse, Siemens, — Schuckert, Isaria, etc.,

U_{eff} et I_{eff} étant les valeurs efficaces de U et de I , ω la pulsation du courant et φ de décalage entre I et U .

Les champs h_1 et h_2 pourraient s'écrire :

$$h_1 = a_1 \mathcal{H}_1 \sin(\omega t - \varphi - \theta_1), \quad h_2 = a_2 \cdot \mathcal{H}_2 \cdot \sin(\omega t - \theta_2),$$

\mathcal{H}_1 et \mathcal{H}_2 étant leurs valeurs maxima, a_1 et a_2 deux quantités indépendantes du temps, mais variant avec la position du point considéré ;

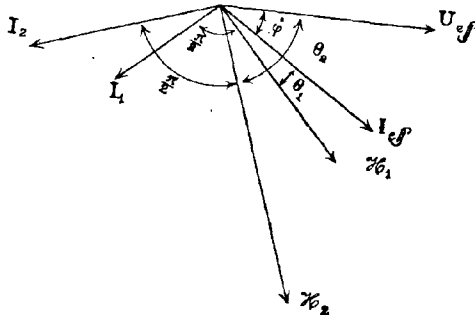


Fig. 49.

(a_1 et a_2 sont $\ll 1$), θ_1 et θ_2 les décalages de h_1 et h_2 par rapport à I et à U (fig. 49).

Supposons d'abord le disque au repos. — Les champs h_1 et h_2 y induisent des forces électromotrices proportionnelles à \mathcal{H}_1 et à \mathcal{H}_2 et à la pulsation ω , et décalées dans le temps de $\frac{\pi}{2}$ en arrière par rapport à ces champs ; ces f. e. m. produisent deux *nappes de courant*, dont les *intensités totales* i_1 et i_2 sont proportionnelles, et en phase avec elles, et inversement proportionnelles à R_1 et R_2 , résistances totales du disque relatives à ces nappes de courant ⁽¹⁾.

On pourra donc écrire :

$$i_1 = b_1 \cdot \frac{\mathcal{H}_1 \omega}{R_1} \cos(\omega t - \varphi - \theta_1) \quad \text{et} \quad i_2 = b_2 \cdot \frac{\mathcal{H}_2 \omega}{R_2} \cos(\omega t - \theta_2).$$

(1) Nous ne faisons pas intervenir la self-induction du disque, parce qu'on en tient compte, lorsqu'on prend pour h_1 et h_2 les champs résultants des champs créés par les bobines, par les spires en court circuit et par les courants dans le disque ; ces derniers sont justement les champs de réaction du disque. Nous les expliciterons plus tard.

L'action du champ h_1 sur la nappe de courant i_2 sera, en chaque point, proportionnelle au produit de h_1 par la valeur du courant passant en ce point. Le couple total moyen, sera donc proportionnel au produit moyen de h_1 par i_2 , ou encore à :

$$\mathcal{H}_1 \cdot \frac{\mathcal{H}_2 \omega}{R_2} \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} + \theta_2 - \theta_1 - \varphi \right).$$

On aura donc, en valeur absolue,

$$(29) \quad C_1 = A_1 \cdot \frac{\mathcal{H}_1 \mathcal{H}_2 \omega}{R_2} \sin (\theta_2 - \theta_1 - \varphi).$$

De même l'action de h_2 sur i_1 donnera un couple :

$$(30) \quad C_2 = A_2 \cdot \frac{\mathcal{H}_1 \cdot \mathcal{H}_2 \cdot \omega}{R_1} \sin (\theta_2 - \theta_1 - \varphi).$$

Ces deux couples sont de même signe et s'ajoutent. En effet, si h_1 avait par rapport à i_2 la même situation dans l'espace que h_2 par rapport à i_1 , les signes des couples seraient donnés par les signes des cosinus des angles $\frac{\pi}{2} + \theta_2 - \theta_1 - \varphi$ et $\frac{\pi}{2} + \theta_1 + \varphi - \theta_2$, que font respectivement les vecteurs \mathcal{H}_1 avec I_2 et \mathcal{H}_2 avec I_1 (fig. 49). Ces cosinus *sont de signes contraires*, le premier angle étant $> \frac{\pi}{2}$ et l'autre $< \frac{\pi}{2}$.

Mais les situations des champs par rapport aux nappes de courant étant croisées, ceci entraîne un autre changement de signe et, en définitive, C_1 et C_2 sont de même signe.

Si nous remarquons maintenant que $R_1 = \alpha_1 \frac{\rho}{e}$ et $R_2 = \alpha_2 \frac{\rho}{e}$ (e étant l'épaisseur du disque, ρ la résistivité du métal dont il est fait, α_1 et α_2 des constantes) on a, pour le *couple actif* :

$$(31) \quad C = C_1 + C_2 = A \frac{\rho}{e} \omega \mathcal{H}_1 \mathcal{H}_2 \sin (\theta_2 - \theta_1 - \varphi),$$

en posant :

$$A = \frac{A_1}{\alpha_1} + \frac{A_2}{\alpha_2}.$$

Supposons maintenant, que le disque tourne avec une vitesse angulaire ω' . Le couple actif C garde la même valeur, et il s'y ajoute un couple antagoniste, somme de trois couples provenant de la rotation du disque devant les champs non uniformes h_1 , h_2 , et h (h étant le champ créé par l'aimant permanent).

Cherchons l'expression du couple donné par h_1 . A un instant quelconque, la f. é. m. induite par h_1 dans un élément linéaire du disque en mouvement est proportionnelle à $h_1\omega'$, ω' étant la vitesse angulaire de cet élément (vitesse égale à celle du disque); on a donc, dans le disque, une *nappe* de f. é. m., qui donne naissance à une nappe de courant (en phase avec elle, parce qu'on néglige la réaction magnétique de ce courant) et proportionnelle, par conséquent, à: $\frac{\mathcal{H}_1\omega'}{R'_1} \cdot \sin(\omega t - \varphi - \theta_1)$. L'action de h_1 sur cette nappe de courant, qui est en phase avec lui, sera un couple dont la valeur moyenne sera proportionnelle à $\mathcal{H}_1 \cdot \frac{\mathcal{H}_1\omega'}{R'_1}$.

On a donc :

$$(32) \quad c_1 = A_1 \frac{\mathcal{H}_1^2\omega'}{R'_1},$$

A_1 étant une constante.

On a, de même, pour l'action de h_2 sur la nappe de courants qui provient du mouvement du disque par rapport à ce champ :

$$(33) \quad c_2 = A'_2 \frac{\mathcal{H}_2^2\omega'}{R'_2},$$

et pour h :

$$(33') \quad c_3 = A_3 \cdot \frac{\mathcal{H}^2\omega'}{R_3}.$$

Leur somme donne le *couple antagoniste*, qu'on peut écrire :

$$(34) \quad c = c_1 + c_2 + c_3 = \omega' \cdot \frac{e}{\rho} \cdot B \cdot \mathcal{H}^2 \left[1 + B_1 \left(\frac{\mathcal{H}_1}{\mathcal{H}} \right)^2 + B_2 \left(\frac{\mathcal{H}_2}{\mathcal{H}} \right)^2 \right],$$

en posant

$$R'_1 = \alpha'_1 \cdot \frac{\rho}{e}, \quad R'_2 = \alpha'_2 \cdot \frac{\rho}{e}, \quad R_3 = \alpha_3 \cdot \frac{\rho}{e},$$

et

$$\frac{A_3}{\alpha'_3} = B, \quad \frac{A_1}{\alpha'_1} = B_1, \quad \frac{A_2}{\alpha_2} = B_2.$$

Comme nous le verrons plus loin, on s'arrange pour que $\frac{\mathcal{H}_1}{\mathcal{H}}$ et $\frac{\mathcal{H}_2}{\mathcal{H}}$ soient faibles devant l'unité. On peut donc écrire, avec une approximation suffisante :

$$(34) \quad c = \omega' \cdot \frac{e}{\rho} \cdot \frac{B \mathcal{H}^2}{1 - B_1 \frac{\mathcal{H}_1^2}{\mathcal{H}^2} - B_2 \frac{\mathcal{H}_2^2}{\mathcal{H}^2}}$$

Pour être plus complet nous allons faire intervenir aussi le couple de frottement F , pratiquement constant, et le *couple compensateur* des frottements. Celui-ci est obtenu en général, soit en créant une dissymétrie dans le circuit magnétique par rapport aux lignes de force du circuit « volts », soit en masquant une partie d'un pôle par une plaque métallique. Dans les deux cas on crée un couple actif supplémentaire produit par le champ h_2 agissant sur ses propres courants induits. Ce couple est donc proportionnel à $\mathcal{H}_2 \times \mathcal{H}_2$ c'est-à-dire à \mathcal{H}_2^2 et peut s'écrire :

$$(35) \quad c' = D \cdot \frac{e}{\rho} \cdot \mathcal{H}_2^2 \cdot \omega.$$

Nous avons vu, page 58, qu'on peut faire la théorie des compteurs, en supposant que le disque tourne d'un mouvement uniforme. Dans ce cas la somme des couples actifs égale celle des couples antagonistes, on aura donc :

$$(36) \quad C + c' = c + F.$$

En remplaçant C , c et c' par leurs valeurs, données par les formules (31), (34) et (35), en négligeant dans les termes correctifs provenant des petits couples c' et F , $B_1 \frac{\mathcal{H}_1^2}{\mathcal{H}^2}$ et $B_2 \frac{\mathcal{H}_2^2}{\mathcal{H}^2}$ devant l'unité, en simplifiant par $\frac{e}{\rho}$ et en posant $\frac{A}{B} = K$ et $\frac{D}{B} = K_1$, on obtient pour ω' , la relation :

$$(37) \quad \omega' = K \cdot \left(1 - B_1 \frac{\mathcal{H}_1^2}{\mathcal{H}^2} - B_2 \frac{\mathcal{H}_2^2}{\mathcal{H}^2} \right) \cdot \frac{\omega \cdot \mathcal{H}_1 \mathcal{H}_2 \sin(\theta_2 - \theta_1 - \varphi)}{\mathcal{H}^2} + K_1 \frac{\omega \mathcal{H}_2^2}{\mathcal{H}^2} - \frac{\rho \cdot F}{B e \mathcal{H}^2}.$$

Les deux derniers termes sont très faibles. Pour les bons compteurs, à partir d'une valeur assez faible de la charge (par exemple 1/20 de la

puissance maxima) ω' est pratiquement égal au premier terme du deuxième membre.

Nous allons transformer la formule (37) en tenant compte des relations qui existent entre les champs et les courants. Remarquons d'abord qu'on emploie presque toujours, dans les compteurs d'induction, *des plaques* ou *des bagues* métalliques (quelques fois des bobines en court-circuit) qu'on place sur le trajet des lignes de force des champs. Dans ces plaques se produisent des courants induits, qui réagissent sur les champs ; d'ailleurs les réactions magnétiques du disque sont pratiquement identiques à la réaction de ces plaques (1).

Quelle est l'influence de ces plaques ? Soit h' un champ existant dans un entrefer ; supposons que nous introduisons une bague B métallique fermée, de résistance r et de coef. de self. l (fig. 50). Soit Φ le flux que h'

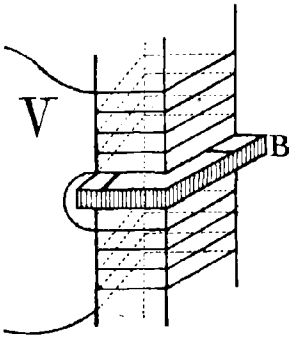


Fig. 50.

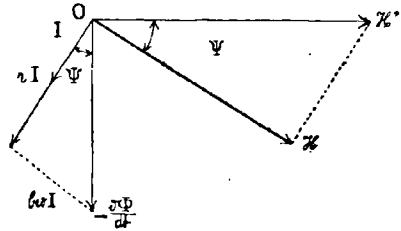


Fig. 51.

envoie à travers B ; ce flux induit une f. e. m. $-\frac{d\Phi}{dt}$, et le courant i dans la bague sera donné par :

$$(38) \quad \frac{d\Phi}{dt} = ri + l \frac{di}{dt} \text{ (fig. 51).}$$

(1) Les nappes de courants induits, qui parcourent le disque, sont la superposition de courants provenant de la variation alternative du champ et de courants provenant de la rotation du disque ; ces derniers sont faibles parce que le disque tourne très lentement ω' petit devant ω) et on peut négliger leur réaction. La réaction du disque est donc la même que si il était au repos, donc la même que celle d'une plaque fixe.

Le courant i produit à son tour un champ, qui lui est proportionnel, et le champ total actuel h dans l'entrefer est la résultante de h' et du champ créé par i . D'autre part, par rapport au flux de h , la bague doit être considérée sans coef. de self. (celui-ci entrant dans la constitution de h) il faut donc que son courant soit en phase avec la f. e. m. totale produite par h , donc décalé de $\frac{\pi}{2}$ en arrière sur celui-ci. Le champ h sera donc en avance de $\frac{\pi}{2}$ sur le courant i et sera représenté par \mathcal{H} ; il est décalé en arrière par rapport à \mathcal{H}' d'un angle Ψ donné par :

$$(39) \quad \text{tg. } \Psi = \frac{l\omega}{r}$$

et a pour valeur maxima :

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}' \cos \Psi = \mathcal{H}' \cdot \frac{r}{\sqrt{r^2 + l^2\omega^2}} = \mathcal{H}' \left(1 + \frac{l^2\omega^2}{r^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

Comme $\frac{l\omega}{r}$ est en général petit, on peut développer $\left(1 + \frac{l^2\omega^2}{r^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$ et ne garder que les deux premiers termes. On a donc :

$$(39') \quad \mathcal{H} = \mathcal{H}' \left(1 - \frac{1}{2} \frac{l^2\omega^2}{r^2}\right),$$

formule très utile.

Exprimons maintenant les champs h_1 et h_2 en fonction des courants i_1 et i_2 , qui passent dans les bobines b_1 et b_2 .

Ces courants produisent dans l'entrefer des champs, respectivement h_1 et h_2 , en phase avec eux et dont les maxima \mathcal{H}'_1 et \mathcal{H}'_2 leurs sont proportionnels.

Supposons, pour plus de généralité, qu'en dehors du disque il se trouve dans l'entrefer des plaques métalliques ou des bagues en court-circuit. Soit R_1 et L_1 la résistance et le coef. de self. globaux du *disque et des plaques* par rapport au champ h_1 ; R_2 et L_2 les mêmes éléments pour le champ h_2 (1).

(1) En particulier, si par rapport aux lignes de force de l'un des champs les bagues n'interviennent pas, les R et L correspondant proviendront du disque seul.

On aura, d'après la formule (39),

$$\mathcal{H}_1 = \mathcal{H}'_1 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{L_1^2 \omega^2}{R_1^2}\right) \quad \text{et} \quad \mathcal{H} = \mathcal{H}'_2 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{L_2^2 \omega^2}{R_2^2}\right).$$

ou, en tenant compte que \mathcal{H}'_1 et \mathcal{H}'_2 sont proportionnelles aux valeurs efficaces I_1 et I_2 de i_1 et i_2 , on a :

$$(40) \quad \mathcal{H}_1 = k_1 \cdot I_1 \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \frac{L_1^2 \omega^2}{R_1^2}\right), \quad \mathcal{H}_2 = k_2 \cdot I_2 \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \frac{L_2^2 \omega^2}{R_2^2}\right)$$

et, si on appelle θ'_1 et θ'_2 les diff. de phases entre h_1 et h'_1 et entre h_2 et h'_2 , on aura :

$$\text{tang. } \theta'_1 = \frac{L_1 \omega}{R_1} \quad \text{et} \quad \text{tang. } \theta'_2 = \frac{L_2 \omega}{R_2}.$$

Dans presque tous les compteurs actuels les bobines à gros fil sont parcourues par tout le courant principal, on a donc $i_1 = I$, et la bobine à fil

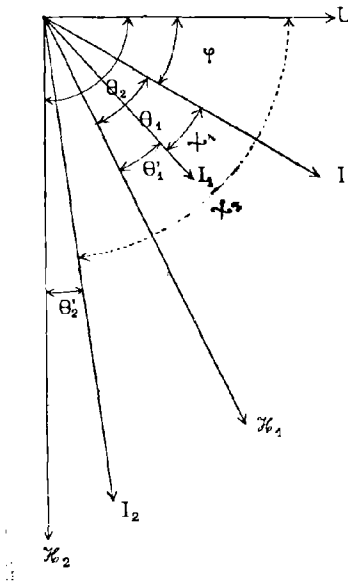


Fig. 51 bis.

fin, de résistance ρ et à laquelle on donne un grand coef. de self. λ , est montée directement sur la diff. de pot. U . Nous supposons ces conditions remplies. On a alors, pour le courant i_2 :

$$i_2 = I_2 \sin (\omega t - \chi_2), \quad (\chi_2 \text{ étant le décalage de } i_2 \text{ sur } U)$$

avec

$$I_2 = \frac{U_{\text{eff}}}{\sqrt{\rho^2 + \lambda^2 \omega^2}} = \frac{U_{\text{eff}}}{\lambda \omega} \left(1 + \frac{\rho^2}{\lambda^2 \omega^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad \text{et} \quad \text{tang. } \chi_2 = \frac{\lambda \omega}{\rho},$$

Comme on s'arrange pour avoir $\frac{\rho}{\lambda \omega}$ petit, on peut écrire :

$$I_2 = \frac{U_{\text{eff}}}{\lambda \omega} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\rho^2}{\lambda^2 \omega^2} \right).$$

Il résulte de ces considérations que :

$$\mathcal{H}_1 = k_1 \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \frac{L_1^2 \omega^2}{R_1^2} \right) \cdot I_{\text{eff}} \quad \text{et} \quad \mathcal{H}_2 = \frac{k_2}{\lambda \omega} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \frac{L_2^2 \omega^2}{R_2^2} \right) \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\rho^2}{\lambda^2 \omega^2} \right) \cdot U_{\text{eff}}.$$

On a, d'autre part : (fig. 54^{bis}) $\theta_1 = \theta'_1$ parce que i_1 est en phase avec I et $\theta_2 = \theta'_2 + \chi_2$, parce que i_2 est décalé de χ_2 sur U , et par conséquent :

$$\begin{aligned} \sin (\theta_2 - \theta_1 - \varphi) &= \sin (\theta'_2 + \chi_2 - \theta'_1 - \varphi) \\ &= \sin (\chi_2 + \theta'_2 - \theta'_1) \cos \varphi \left[1 - \frac{\text{tg } \varphi}{\text{tg} (\chi_2 + \theta'_2 - \theta'_1)} \right], \end{aligned}$$

ou, en remarquant que $\theta'_2 - \theta'_1$ est faible devant χ_2 , et que $\sin \chi_2 = 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho^2}{\lambda^2 \omega^2}$, on a :

$$\begin{aligned} \sin (\theta_2 - \theta_1 - \varphi) &= \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\rho^2}{\lambda^2 \omega^2} \right) \cos \varphi \left[1 - \frac{\text{tg } \varphi}{\text{tg} (\chi_2 + \theta'_2 - \theta'_1)} \right] \\ &= \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\rho^2}{\lambda^2 \omega^2} \right) \cos \varphi \left[1 - (\text{ctg } \chi_2 - \text{tg} (\theta'_2 - \theta'_1)) \text{tg } \varphi \right]. \end{aligned}$$

En posant :

$$P = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos \varphi, \quad \text{et} \quad \frac{K k_1 k_2}{\lambda \mathcal{H}^2} = \mathcal{K},$$

et en remarquant qu'à cause de la petitesse de

$$\frac{L_1^2 \omega^2}{R_1^2}, \quad \frac{L_2^2 \omega^2}{R_2^2} \quad \text{et de} \quad \frac{\rho^2}{\lambda^2 \omega^2},$$

on peut écrire :

$$\left(1 - \frac{1}{2} \frac{L_1^2 \omega^2}{R_1^2} \right) \left(1 - \frac{1}{2} \frac{L_2^2 \omega^2}{R_2^2} \right) = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{L_1^2 \omega^2}{R_1^2} + \frac{L_2^2 \omega^2}{R_2^2} \right),$$

et

$$\left(1 - \frac{1}{2} \frac{\rho^2}{\lambda^2 \omega^2}\right)^2 = 1 - \frac{\rho^2}{\lambda^2 \omega^2},$$

la formule (37) devient :

$$(41) \quad \frac{\omega'}{P} = \pi \cdot \left(1 - B_1 \frac{\mathcal{H}_1^2}{\mathcal{H}^2} - B_2 \frac{\mathcal{H}_2^2}{\mathcal{H}^2}\right) \left(1 - \frac{\rho^2}{\lambda^2 \omega^2}\right) \times \\ \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{L_1^2}{R_1^2} + \frac{L_2^2}{R_2^2}\right) \omega^2\right] \left[1 - (\text{ctg } \chi_2 - \text{tg } (\theta_2' - \theta_1')) \text{ tang. } \varphi\right] \\ + K_1 \frac{\mathcal{H}_2^2 \omega}{\mathcal{H}^2 P} - \frac{\rho \cdot F}{c B \mathcal{H}^2 P}.$$

Cette formule s'applique à presque tous les compteurs actuels.

Il en résulte que, ω' sera bien proportionnel à la puissance, si : $\text{ctg. } \chi_2 - \text{tang. } (\theta_2' - \theta_1') = 0$. Pour cela il faut avoir : 1° ou $\text{ctg. } \chi_2 = 0$ et $\text{tang. } (\theta_2' - \theta_1') = 0$, c'est-à-dire :

$$(42) \quad \chi_2 = \frac{\pi}{2} \text{ et } \theta_2' = \theta_1',$$

ou bien 2° $\text{ctg. } \chi_2 = \text{tang. } (\theta_2' - \theta_1')$ ce qui donne :

$$(43) \quad \chi_2 + (\theta_2' - \theta_1') = \frac{\pi}{2}.$$

Nous verrons, à propos de chaque compteur décrit, les artifices employés pour satisfaire à ces conditions.

Allure générale de la courbe d'étalonnage. — Si on prend en abscisse la puissance et en ordonnée la valeur $\frac{\omega'}{P}$, on devrait obtenir, pour un compteur idéal, une ligne droite horizontale, $\frac{\omega'}{P}$ étant proportionnel à l'inverse de ce qu'on appelle la *constante du compteur* (v. page 54). En réalité on obtient, en général, la courbe (fig. 52). La forme de cette courbe s'explique facilement :

Pour les très faibles valeurs de P, le 2° et le 3° termes de (41) prennent de l'importance et $\frac{\omega'}{P}$ tend vers $-\infty$ si les frottements prédominent, vers $+\infty$ si c'est le terme compensateur qui est plus grand. Aux charges

normales, le 1^{er} terme de $\frac{\omega'}{P}$ a seul une valeur sensible, mais ce terme contient un facteur $\left(1 - B_2 \frac{\mathcal{H}_1^2}{\mathcal{H}_2^2} - B_2 \frac{\mathcal{H}_2^2}{\mathcal{H}_1^2}\right)$ qui dépend de I parce que \mathcal{H}_i en dépend. On s'arrange pour réduire le plus possible la valeur de $B_1 \frac{\mathcal{H}_1^2}{\mathcal{H}_2^2}$,

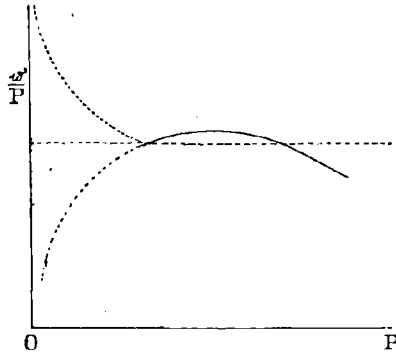


Fig. 52.

mais pour les fortes valeurs de I, ce terme prend une valeur sensible, $\left(1 - B_1 \frac{\mathcal{H}_1^2}{\mathcal{H}_2^2} - B_2 \frac{\mathcal{H}_2^2}{\mathcal{H}_1^2}\right)$ diminue, ce qui fait retarder le compteur.

Influence de $\cos \varphi$. — Il est difficile d'arriver à satisfaire d'une façon exacte aux conditions (42) ou (43). La formule (41) montre que, si ces

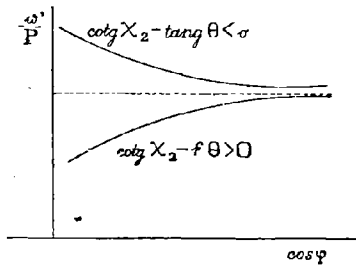


Fig. 53.

conditions ne sont pas remplies, $\frac{\omega'}{P}$ dépendra de φ , et que le compteur sera d'autant moins exact que φ sera plus grand, Les compteurs d'in-

duction marcheront moins bien en circuit fortement inductif qu'à circuit non inductif. D'ailleurs, à circuit inductif, le compteur avancera ou retardera suivant que : $\text{ctg. } \lambda_2 - \text{tang. } (\theta_2' - \theta_1') \leq 0$. La figure 53 donne des courbes de variations de $\frac{\omega'}{P}$ en fonction de $\cos \varphi$, pour une puissance P constante.

Influence de la fréquence et de la température. — Dans le terme principal de (41) la fréquence N ($\omega = 2\pi N$) se trouve dans les mêmes termes que les résistances R_1 , R_2 et ρ qui varient avec la température. Il en résulte, que tout compteur peu sensible à la variation de la fréquence, sera

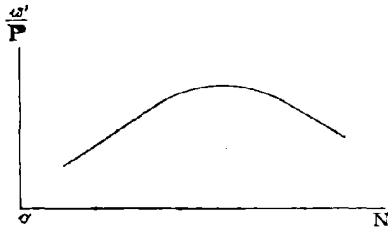


Fig. 54.

aussi peu influencé par la température ; l'influence de ces deux éléments étant plus grande en circuit inductif ⁽¹⁾. La figure 54 donne l'allure générale de la courbe de variation de $\frac{\omega'}{P}$ en fonction de la fréquence, pour P constant et circuit inductif.

Réglage d'un compteur d'induction. — 1° On commence, en général par s'arranger pour que le compteur ne marche pas à vide, (ceci peut arriver si la compensation des frottements est trop grande). Pour cela on agit sur le couple de compensation des frottements, en rendant par exemple le circuit magnétique des « volts » plus ou moins dissymétrique. Nous verrons d'autres moyens dans la description.

2° On le règle ensuite pour qu'il soit exact en pleine charge non inductive, en agissant sur les aimants permanents ou sur leurs shunts magnétiques.

(1) Voir pour plus de détails : Ilivici, article cité.

3° On fait le réglage à faible charge ($1/10$ ou $1/20$ de la pleine charge) en agissant sur la compensation des frottements comme pour 1°.

4° Enfin le réglage en circuit inductif (qui se fait en général pour $\cos \varphi = 0,3$ ou pour $\cos \varphi = 0$) (1) est obtenu à l'aide des artifices qui doivent assurer les conditions (42) ou (43) (Voir aux descriptions des appareils).

TABLEAU III
Compteurs d'induction.
Calibre : 10 ampères, 110 volts, fréquence 42 \sim .

Type	Couple (gr. cm.)	Poids gr.	Constante	Equipage mobile				Bobines volts			
				Forme	Métal	Diamètre	Épaisseur	Nombre de bobines	Nombre de spires	Rés.	Consom.
ACT 3 . . .	env. 3,5	env. 24	env. 0,35	Disque	Alum.	85	1,2	1	3500	150	0,9
Cosinus MR	3	55	0,278	id.	Cuivre	80	1	2	2 × 2200	190	0,8
B. T . . .	9	55	0,278	id.	Cuivre	80	1	2	2 × 2800	280	0,8
A. E. G. . .	4,5	30	0,416	id.	Alum.	105	1	2	2 × 2000	220	—
Aron. . .	3,6	26	0,33	id.	Alum.	96	1	2	2 × 2500	620	—

Type	Bobines « ampères »			Épaisseur de l'entrefer des électroaimants (mm)
	Nombre de bobines	Nombre de spires (total)	Diff. de pot. maxim. (volts)	
ACT 3	2	8	0,1	environ 3
Cosinus MR	1	30	—	3
BT	1	9	—	3
A. E. G.	2	—	—	—
Aron.	1	8	—	3

(1) Pour avoir le décalage $\varphi = \frac{\pi}{2}$ entre les ampères et les volts du compteur, on peut les prendre séparément sur les deux phases d'un alternateur diphasé.

Avantages et inconvénients des compteurs d'induction. — Ce sont les appareils qui tendent à être presque seuls employés en courant alternatif. Ils sont d'une construction simple ; leur équipement mobile qui est plus léger que celui des autres systèmes de compteurs, n'a aucune relation électrique avec l'extérieur, d'où suppression des balais qui donnent des frottements gênants. Ces compteurs sont peu influencés par les champs magnétiques extérieurs.

Leurs principaux inconvénients proviennent de l'influence de la fréquence, de la forme du courant et de la température ; mais on peut réduire ces influences à des valeurs pratiquement admissibles. En circuit fortement inductif il est difficile de les rendre exacts.

DESCRIPTION DE QUELQUES APPAREILS

Compteur A.C.T. 3. ⁽¹⁾ (fig. 47 et 55). — Le disque est en aluminium. Le stator se compose d'un électro-aimant formé d'un certain

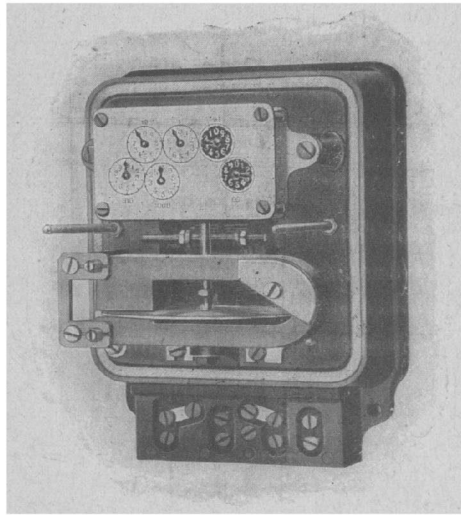


Fig. 55.

nombre de tôles ayant la forme de la fig. 47 a ; Il contient une seule

(1) Construit par la Cie pour la fabrication des Compteurs.

bobine de fil fin, enroulé sur le noyau central, et deux bobines parcourues par le courant.

Ces deux bobines sont en série et enroulées de façon à donner deux pôles de noms contraires. L'armature se trouve à une certaine distance des pôles de l'électro-aimant de façon à laisser un entrefer, dans lequel se déplace le disque.

La bobine à fil fin est montée directement sur la diff. de pot. Pour satisfaire à la condition (43), on donne à la bobine à fil fin une forte réactance en fermant son circuit magnétique par des tôles t, t (fig. 56), ce

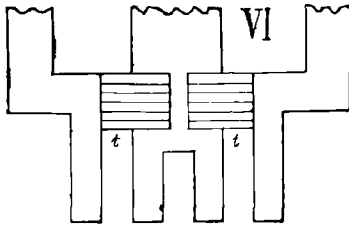


Fig. 56.

qui donne un fort décalage χ_2 au courant i_2 dans la bobine par rapport à la diff. de pot. aux bornes ; on a donc $\cotg \chi_2$ petit ⁽¹⁾.

Pour le réglage final on agit sur θ_2' . Pour cela le noyau central est entouré, immédiatement au dessous des tôles t, t , par une spire S en cuivre dont le circuit est fermé par une vis en deux métaux, cuivre et constantan ou cuivre et maillechort ⁽²⁾. En faisant varier la position de la vis, la résistance totale de la spire change.

Dans ces conditions, θ_1' provient seulement de la réaction du disque par rapport au champ h_1' et reste pratiquement constant ; tandis que θ_2' provient de l'action combinée du disque et de la spire S. On a vu page 88 que $\tan \theta_2' = \frac{L_2 \omega}{R_2}$, L_2 étant le coeff. de self. et R_2 la résistance de l'ensemble du disque et de la spire S. En faisant varier la résistance de S on fait varier R_2 donc θ_2' , et on peut rendre $\tan (\theta_2' - \theta_1') = \cotg \chi_2$.

⁽¹⁾ Le champ h_2 dans l'entrefer du disque provient des fuites magnétiques par rapport au circuit magnétique fermé.

⁽²⁾ On voit cette vis vers le milieu de la figure 55.

La figure 47 *b* indique le tracé approximatif de la ligne de force moyenne, et la figure 47 *c*, la distribution approximative des champs h_1 et h_2 le long d'une circonférence du disque.

Le couple amortisseur est donné par un aimant permanent dont on

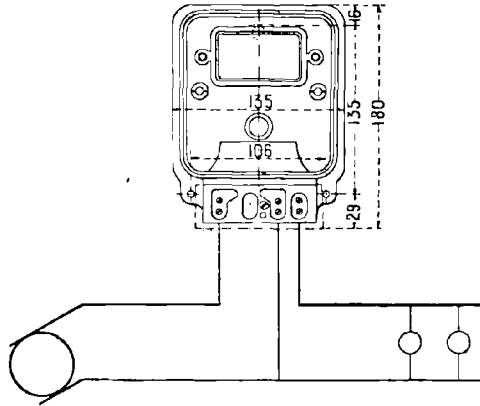


Fig. 57.

règle l'action à l'aide d'un shunt magnétique vu à gauche de la figure 55 (voir aussi page 73). Un écran magnétique empêche l'influence démagnétisante de l'électro-aimant sur l'aimant permanent.

Les compteurs monophasés pour circuit à 3 fils ont la même consti-

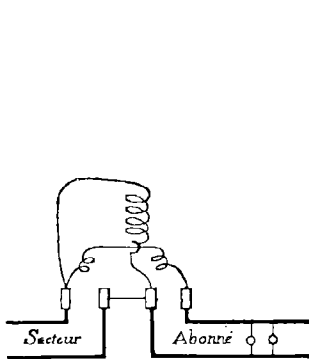


Fig. 57bis.

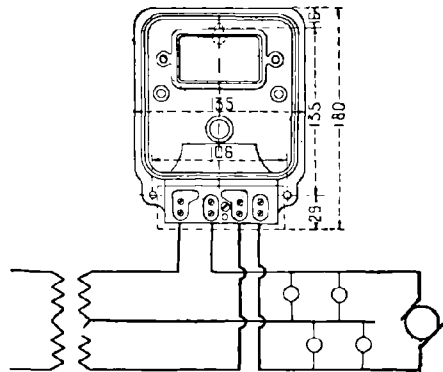


Fig. 58.

tution, sauf que les bobines « ampères » contiennent deux enroulements parcourus chacun par le courant d'un des fils extrêmes de l'installation. Le fil fin est monté sur la diff. de pot. totale.

Les figures 57 et 57^{bis} indiquent le montage d'un compteur pour circuit à deux fils, la figure 58 pour circuit à 3 fils.

Réglage. — A vide et à faible charge non inductive (au $\frac{1}{20}$ de la charge maxima) le réglage se fait par le déplacement de l'armature de l'électro-aimant ; à forte charge non inductive, en agissant sur le shunt de l'aimant permanent. Le réglage de la marche en circuit inductif se fait, pour $\cos \varphi = 0,3$, à l'aide de la vis en cuivre-constantan dont on a parlé plus haut.

Compteur « Cosinus » type M. R. (1) (fig. 48, 59, 60 et 61). — Le disque est en cuivre. Le stator se compose de deux électro-aimants ; l'un placé au-dessus du disque contient la bobine à fil fin, l'autre en dessous contient la bobine « ampères ». Le circuit magnétique du premier électro-aimant est presque fermé (à l'aide du parallélogramme en tôles T fig. 61) ; on laisse seulement de petits entrefers en carton dont l'épaisseur dépend de la fréquence à laquelle l'appareil doit fonctionner. Une armature en fer plein assez épais (3 millimètres environ) forme avec les électros un entrefer dans lequel se déplace le disque. Une lamelle en fer doux L (fig. 61) permet de créer une dissymétrie dans le champ « volts ».

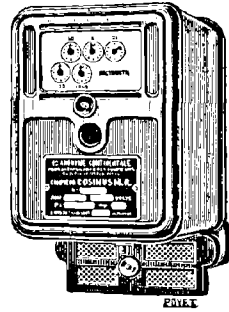


Fig. 59.

L'électro « ampère » est à circuit magnétique ouvert ; une vis U en fer permet, en l'enfonçant plus ou moins, de faire varier la réaction du disque par rapport au champ qu'il produit.

Pour arriver à la condition (43), le circuit magnétique de la bobine à fil fin est presque fermé, donc X_2 très grand ; d'autre part on a rendu θ'_2 assez grand en ajoutant à la réaction du disque par rapport au champ « volt » celle de l'armature qui, à cause de son épaisseur, agit, par ses courants de Foucault, comme une bague en court circuit. Le réglage final se fait sur θ'_1 . On a $\tan \theta'_1 = \frac{L_1 \omega}{R_1}$, L_1 et R_1 étant pratiquement le

(1) Construit par la C^{ie} Anonyme Continentale pour la fabrication des Compteurs.

coef. de self. et la résistance du disque seul, par rapport au circuit « ampère ». Pour faire varier θ_1' on agit sur L_1 , en enfonçant plus ou

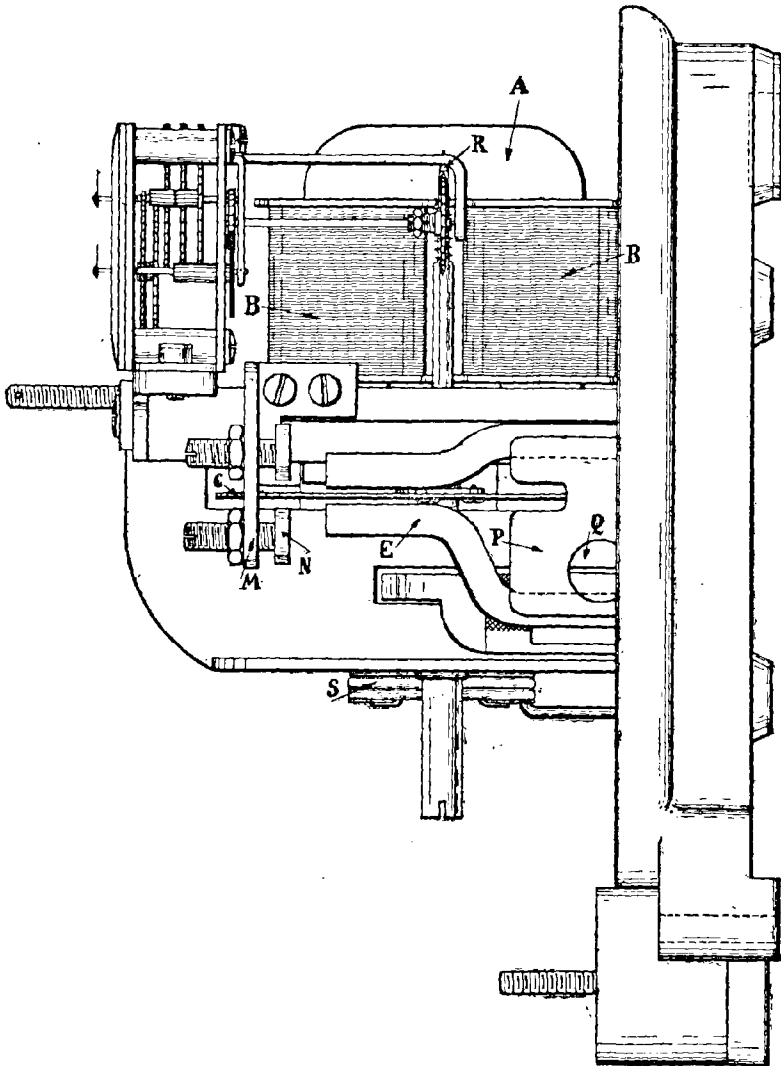


Fig. 60.

moins la vis U (fig. 64), ce qui fait varier la réductance du circuit

magnétique parcouru par les lignes de force créées par le courant induit dans le disque.

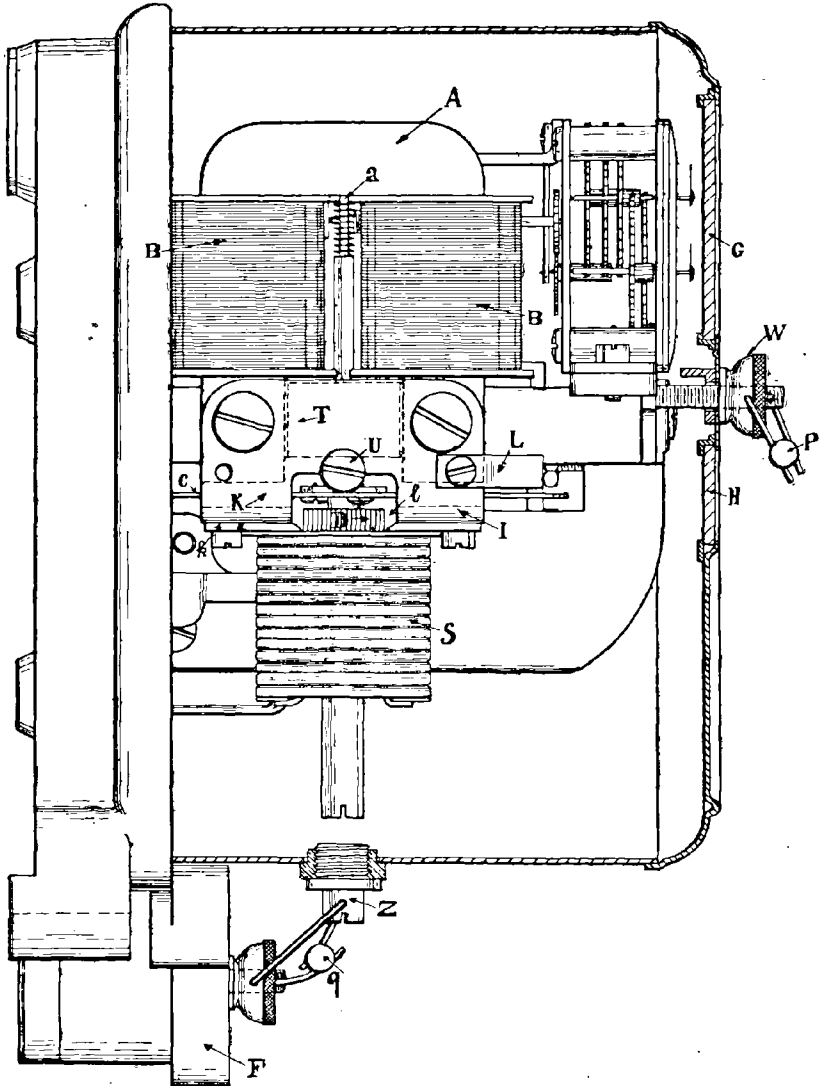


Fig. 61.

La figure 48 *b* et *c*, donne un tracé approximatif de la ligne de force moyenne et la répartition approximative des champs le long d'une circonférence du disque.

L'amortissement est donné par un aimant permanent dont on règle l'action à l'aide d'un shunt magnétique.

Le mouvement d'horlogerie est le même pour tous les calibres ; la vis sans fin qui se trouve sur l'arbre du disque reste aussi la même. Une seule paire de roues dentées change d'un appareil à l'autre.

L'unité enregistrée est le H. W. II. pour les calibres jusqu'à 200 H. W. ; au-dessus c'est le K. W. H. — Jusqu'à 100 H. W. on peut aussi enregistrer le D. W. H.

Dans les forts calibres on dispose les entrées des gros fils de façon que leurs courants n'influencent pas l'équipage mobile.

Réglage. — On s'arrange d'abord pour que le compteur ne marche pas à vide, en agissant sur la lamelle L ; on règle ensuite la vis U de façon que le compteur ne tourne pas lorsque $\cos \varphi = 0$ (courant complètement inductif). On fait ensuite le réglage en pleine charge, circuit non inductif, en agissant sur le shunt de l'aimant permanent. Il est bon de vérifier aussi que l'appareil fonctionne bien au $\frac{1}{10}$ ou au $\frac{1}{20}$ de la pleine charge — sinon on agit sur la lamelle L.

Compteur B. T., modèle I ⁽¹⁾. (fig. 46 et 62). — Le disque est en cuivre. Le rotor est formé d'un seul électro-aimant dont les tôles ont la forme (fig. 46 a).

Les deux bobines à fil fin sont montées en série : une seule bobine « ampères ». La disposition de ces bobines est à peu près l'inverse de celle du compteur A. C. T. 3. Le circuit magnétique est fermé par une armature qui laisse un entrefer dans lequel tourne le disque ; cette armature peut être déplacée à l'aide d'une vis. Le tracé de la ligne de force moyenne et la distribution du champ dans l'entrefer sont donnés par la figure 46 b et c.

La condition (43) est obtenue, à peu près comme pour ACT 3. La différence essentielle consiste en ce que la bague en court circuit est double, parce qu'on a deux bobines « volts », et complètement fermée ; on fait varier

(1) Construit par la C^{ie} de Construction électrique.

son action en la déplaçant en hauteur, ce qui fait varier son coef. de self-induction.

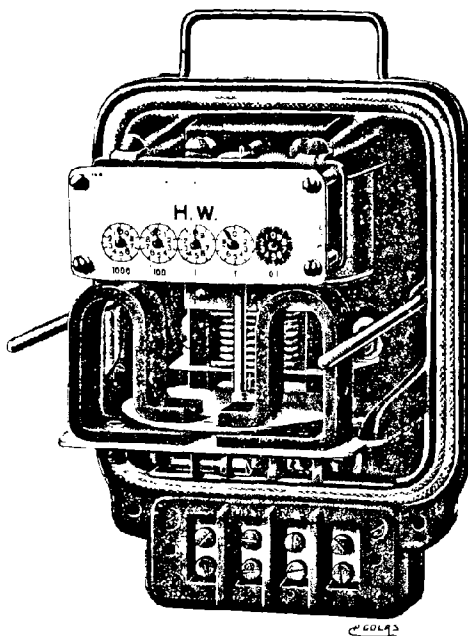


Fig. 62.

Le couple amortisseur est obtenu à l'aide de deux aimants, dont les

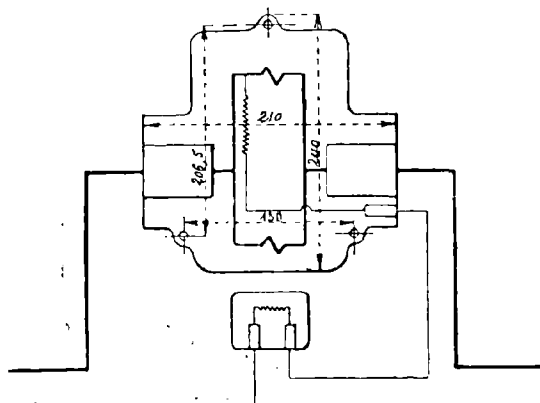


Fig. 63. — Montage d'un compteur monophasé de 300 à 500 ampères et 500 volts. pôles en regard sont de signes contraires ; on règle leur action en faisant varier la distance entre eux.

Les montages sont à peu près les mêmes que pour les compteurs précédents. Pour les calibres au-dessus de 150 ampères les bornes sont sur les côtés ; pour les voltages supérieurs à 110 on ajoute souvent des bobines de réactance en série avec les bobines à fil fin (fig. 63).

Réglage. — Pour empêcher la marche à vide et pour régler la marche aux petits débits, on déplace latéralement l'armature de l'électro-aimant. Le réglage en pleine charge non inductive se fait par le déplacement des aimants, et aussi en faisant varier l'entrefer de l'électro-aimant par le déplacement en hauteur de l'armature. Le réglage en circuit inductif ($\cos \varphi = 0,3$ par exemple) se fait en déplaçant en hauteur la bague en court-circuit.

Compteur de la Société Française d'électricité A. E. G. type L. J. a. (fig. 64). — Dans ce compteur le disque est en aluminium. Le stator

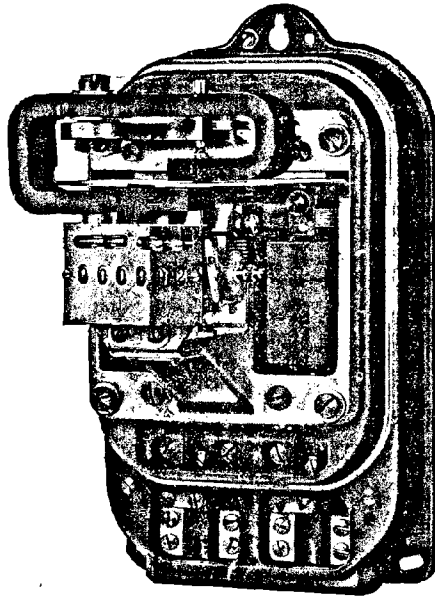


Fig. 64.

est formé d'un électro-aimant ayant trois branches dont celle du milieu est plus courte que les deux autres. Sur les branches latérales sont montées deux bobines « volts » en série ; pour que le circuit de ces bobines

ait une forte réactance, leur circuit magnétique est fermé par une armature latérale. La branche moyenne contient deux bobines « ampères » (1). Le circuit, magnétique est fermé par une armature, qui laisse un entrefer dans lequel se déplace le disque. L'amortissement est donné par un fort aimant permanent dont l'action est réglée en le faisant tourner autour d'un axe vertical.

Dans ce compteur, on obtient la condition (43) de la façon suivante : le circuit des volts est fortement inductif, donc X_2 très grand et $\cotg. X_2$ est très petit. D'autre part $\theta'_2 > \theta'_1$ parce que la réaction du disque est de beaucoup plus forte par rapport au champ des « volts » que par rapport à celui des « ampères », ce dernier ayant un entrefer plus grand. Pour avoir $\text{tang.} (\theta'_2 - \theta'_1) = \cotg. X_2$ on agit sur θ'_1 .

Pour cela le circuit magnétique de la bobine « ampère » est en partie fermé par une lame de fer, sur laquelle se trouve une bague en cuivre en court-circuit, dont on peut faire varier la position. La lame en fer doux se trouve en partie dans l'entrefer de l'électro « ampère ». Elle sert à réduire l'entrefer, et elle joue aussi le rôle de bague en court-circuit. La bague en cuivre joue le rôle du secondaire d'un transformateur à forte dispersion magnétique. En changeant sa position, on peut faire varier cette dispersion ; on fait donc passer plus ou moins de lignes de force vers le disque, ce qui fait varier sa réaction — d'où possibilité de réglage de θ'_1 .

Le réglage à faible charge se fait en créant une dissymétrie dans le circuit magnétique « volts » par le déplacement d'une petite équerre en fer doux. Pour empêcher la marche à vide, on place un petit crochet en fer doux sur le disque.

Le pivot de cet appareil est analogue à celui de la figure 36. Toutes les parties essentielles de l'appareil sont montées sur un cadre qu'il suffit de dévisser pour les voir ou les réparer.

Compteur Westinghouse (fig. 65). — Disque en aluminium. L'équipage mobile tourne à faible vitesse (25 t/m environ à pleine charge, tandis que la plupart des autres compteurs font 50 à 60 t/m). Le circuit

(1) Ceci permet de connecter au compteur les deux fils de l'installation

magnétique, un peu complexe, contient une bobine « volts » et deux bobines « ampères ». La condition (43) est obtenue à l'aide de spires en court-circuit. La compensation des frottements s'obtient aussi à l'aide de plaques métalliques convenablement placées. Le pivot est à billes. Le poids de l'équipage mobile est de 15 gr., le couple actif est de 4 gr. cms. environ.

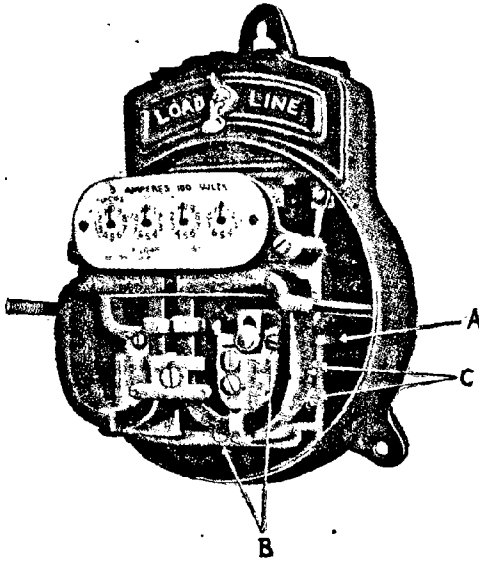


Fig. 65.

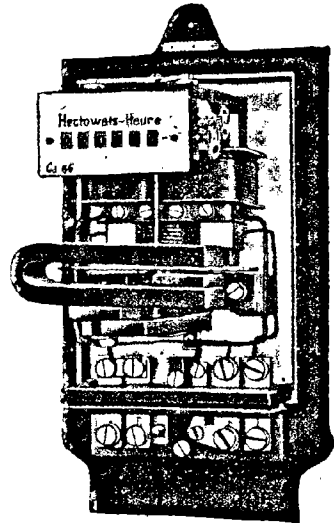


Fig. 66.

Compteur Aron (fig. 66). — Disque en aluminium. Deux bobines « volts », une bobine « ampères ». La condition (43) est obtenue à l'aide de deux bagues en court-circuit montées sur les deux pôles extérieurs de l'électro-aimant.

B) COMPTEURS A SERVOMOTEURS

I. — *Compteurs à balancier Aron*

Nous ne décrivons, comme compteur à servomoteur mécanique, que le compteur à balancier Aron, qui est presque le seul de ce système employé pratiquement. Ce compteur se fait en plusieurs types. Nous nous

occuperons particulièrement du *wattheuremètre à remontage électroautomatique*.

Principe. — On sait que la période d'une oscillation simple d'un pendule ou d'un système oscillant, non amorti, est donnée par la formule $T = \pi \sqrt{\frac{\Omega}{C}}$, Ω étant le moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation et C la constante de proportionnalité du couple actif. Le nombre d'oscillations que fera ce pendule pendant un temps t sera donné par

$$(44) \quad n = \frac{t}{T} = \frac{t}{\pi} \sqrt{\frac{C}{\Omega}}$$

Supposons deux pendules identiques dont l'un soit soumis à l'action de la pesanteur seule et l'autre à celle-ci augmentée ou diminuée d'une action électromagnétique ou électrodynamique. Soit n_1 le nombre d'oscillations que fait le premier pendule pendant le temps t , et n_2 celui du deuxième, C_1 et $C_1 \pm c_1$, les valeurs C pour ces deux appareils. On aura

$$n_1 = \frac{t}{\pi} \sqrt{\frac{C_1}{\Omega}} \quad \text{et} \quad n_2 = \frac{t}{\pi} \sqrt{\frac{C_1 \pm c_1}{\Omega}} = \frac{t}{\pi} \sqrt{\frac{C_1}{\Omega}} \cdot \left(1 \pm \frac{c_1}{C_1}\right)^{\frac{1}{2}} = n_1 \left(1 \pm \frac{c_1}{C_1}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Si nous supposons $\frac{c_1}{C_1}$ suffisamment petit, on peut développer $\left(1 \pm \frac{c_1}{C_1}\right)^{\frac{1}{2}}$ en série et on aura :

$$(45) \quad n_2 = n_1 \left[1 \pm \frac{1}{2} \frac{c_1}{C_1} - \frac{1}{8} \cdot \left(\frac{c_1}{C_1}\right)^2 \pm \dots \right]$$

ou

$$n_2 = n_1 \left[1 \pm \frac{1}{2} \frac{c_1}{C_1} \right],$$

si on peut négliger les termes de degrés supérieurs.

La différence entre le nombre d'oscillations des deux pendules pendant le temps t sera :

$$(46) \quad n_2 - n_1 = \pm \frac{n_1 c_1}{2 C_1}$$

Si le couple supplémentaire provient de l'action d'une bobine fixe parcourue par un courant I sur un aimant permanent porté par le

deuxième pendule, c_1 sera proportionnel à I et $n_1 c_1$ à la quantité d'électricité $It = Q$. Si au contraire ce dernier pendule porte une bobine à fil fin dérivée sur la diff. de pot. U du circuit, c_1 sera proportionnel à UI et $n_1 c_1$ à l'énergie $W = UIt$.

Avec les pendules précédents on peut construire deux horloges dont les minuterics avanceront d'angles proportionnels à n_1 et n_2 ; la différence des deux angles sera, dans le premier cas, proportionnelle à une quantité d'électricité Q et l'ensemble constituera un *ampèreheuremètre*, dans le second cas à une énergie W et on aura un *wattheuremètre*.

Mais on peut faire agir les deux pendules, par l'intermédiaire d'un diffé-

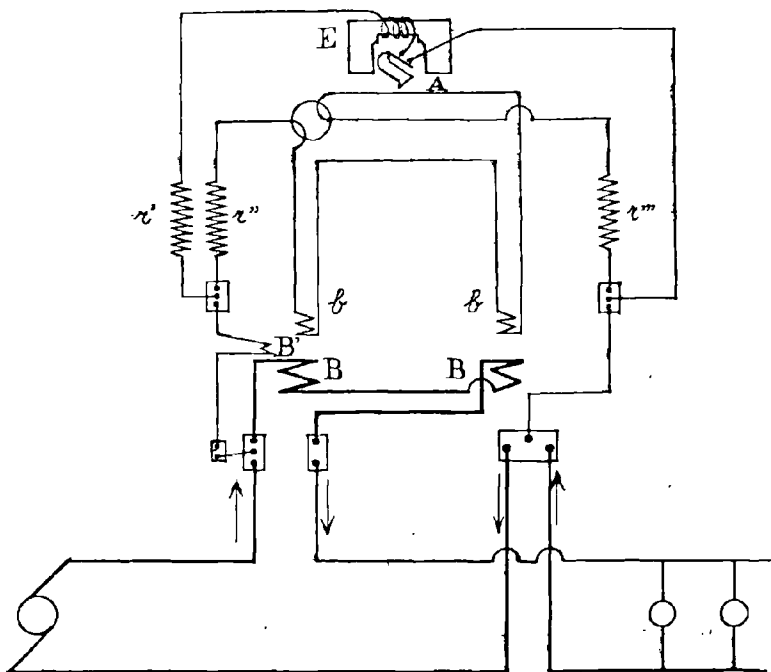


Fig. 67.

rentiel, sur une seule minuterie, qui tournera d'un angle proportionnel à $n_2 - n_1$, et qui pourra donc être graduée directement en AH ou en WH.

Pour que ce que nous disions précédemment soit vrai, il faut que les deux pendules soient parfaitement identiques : ils doivent avoir le même

moment d'inertie et le même couple C_1 , c'est-à-dire qu'ils doivent être synchrones. Le synchronisme est très difficile à obtenir et pourrait donner lieu à des phénomènes de résonance entre les deux pendules, qui fausseraient les résultats.

Pour éviter la nécessité du synchronisme on prend les dispositions suivantes, dans les wattheuremètres (fig. 67), qui sont presque seuls employés. On monte sur chacun des pendules une bobine à fil fin. Les deux bobines identiques sont en série et enroulées dans le même sens. L'ensemble, en série avec une résistance additionnelle appropriée, est monté sur la diff. de pot. U du circuit d'utilisation. Deux bobines fixes identiques entre elles, enroulées dans le sens contraire et parcourues par le courant I se trouvent identiquement placées en face des bobines mobiles. On a ainsi sur les pendules deux actions supplémentaires égales et de signes contraires. Un dispositif produit, à des intervalles réguliers, l'inversion des courants dans les bobines à fil fin.

Si n_1 et n'_1 sont les nombres d'oscillations des pendules à vide pendant un temps t ; n_2 et n'_2 les nombres de ces oscillations pour une puissance P, donnant des couples supplémentaires c_1 et $-c_1$, on aura :

$$(47) \quad n_2 = n_1 \left[1 + \frac{1}{2} \frac{c_1}{C_1} - \frac{1}{8} \frac{c_1^2}{C_1^2} + \dots \right]$$

et

$$(48) \quad n'_2 = n'_1 \left[1 - \frac{1}{2} \frac{c_1}{C_1} - \frac{1}{8} \frac{c_1^2}{C_1^2} - \dots \right]^{(1)}$$

Si on dispose maintenant l'appareil de façon que, pendant un temps égal au précédent, les sens des courants dans les deux bobines à fil fin s'inversent, on aura, pendant ce temps, des nombres d'oscillations N_2 et N'_2 donnés par :

$$(47') \quad N_2 = n_1 \left[1 - \frac{1}{2} \frac{c_1}{C_1} - \frac{1}{8} \frac{c_1^2}{C_1^2} - \dots \right]$$

et

$$(48') \quad N'_2 = n'_1 \left[1 + \frac{1}{2} \frac{c_1}{C_1} - \frac{1}{8} \frac{c_1^2}{C_1^2} + \dots \right]$$

(1) On a $C' \neq C_1$, donc $n_1 \neq n'_1$, parce que les pendules ne sont pas identiques.

Ces formules nous donnent : $n_2 - n'_2 + N'_2 - N_2 = \left(\frac{n_1}{C_1} + \frac{n'_1}{C'_1} \right) c_1 +$ des termes supérieurs au 2^e degré en $\frac{c_1}{C_1}$ et $\frac{c_1}{C'_1}$.

Si on néglige les termes supplémentaires on a, c_1 étant proportionnel à W :

$$(49) \quad n_2 - n'_2 + N'_2 - N_2 = K \cdot W,$$

Le premier membre de (49) représente *l'avance du premier pendule sur le deuxième dans le premier intervalle de temps, plus celle du deuxième sur le premier, dans le second intervalle.*

On s'arrange de façon que le mouvement d'horlogerie enregistre cette somme (voir plus bas). Par l'artifice de l'inversion du courant dans le fil fin, à des intervalles réguliers, on obtient donc un appareil exact, malgré que les pendules ne sont pas identiques.

Le système avec deux pendules actifs a encore deux avantages :

1^o Dans des conditions identiques il est plus sensible, $n_2 - n'$ étant à peu près deux fois plus grand que $n_2 - n_1$, pour la même valeur de $\frac{c_1}{C_1}$.

2^o On peut donner à $\frac{c_1}{C_1}$ une valeur plus grande, parce qu'on n'a à négliger que les termes à partir du $\left(\frac{c_1}{C_1} \right)^3$, tandis que dans les appareils à un seul pendule actif on doit pouvoir négliger aussi le terme en $\left(\frac{c_1}{C_1} \right)^2$.

Description du wattheuremètre à remontage électro-automatique (fig. 67^{bis}). — Deux mouvements d'horlogerie, commandés par un seul ressort, par l'intermédiaire d'un différentiel, sont réglés par deux pendules, du genre de ceux indiqués. Les mouvements des deux pendules sont transmis, par l'intermédiaire d'un deuxième différentiel, à un mouvement d'horlogerie unique, qui enregistre la différence de leurs oscillations.

Un inverseur spécial change, à des intervalles à peu près égaux, le sens du courant dans les deux fils fins, ce qui fait avancer tantôt l'un, tantôt

l'autre des pendules ; mais, en même temps, il change le sens de la transmission des oscillations au mouvement d'horlogerie ; de sorte que celui-ci tourne toujours dans le même sens et enregistre toujours l'excès du pendule qui oscille plus vite (voir plus haut).

Remontage. — Le remontage du ressort se fait à peu près toutes les 30 secondes, à l'aide d'un petit électro A (fig. 67) dont l'armature E mobile

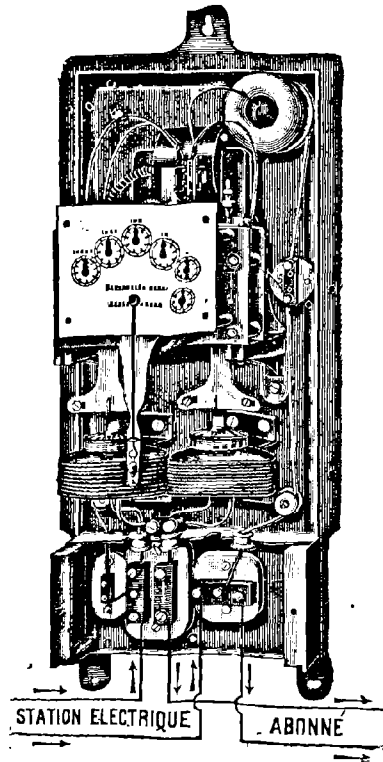


Fig. 67 bis.

peut tourner autour d'un axe horizontal. Le ressort a une extrémité fixe et l'autre reliée à l'armature ; celle-ci, lorsqu'elle prend la direction des pôles de l'électro, tire sur l'extrémité du ressort et l'arme. Le ressort se détend et entraîne l'armature dans le sens contraire, mais celle-ci ne peut se déplacer dans ce sens qu'en entraînant avec elle la roue qui mène les deux mouvements d'horlogerie.

Sur l'électro-aimant est enroulé un fil fin en série avec une résistance r' et le tout est monté sur la diff. de pot. Le courant ne passe dans ce fil que lorsque le ressort a besoin d'être armé, et juste le temps nécessaire à cette opération — pour cela l'armature porte un petit inter-

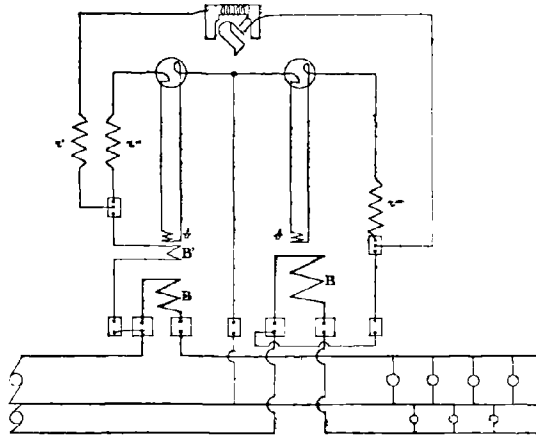


Fig. 68.

rupteur qui ne ferme le courant que pour une position déterminée de celle-ci.

La figure 67 donne le schéma du montage d'un compteur à 2 fils ; la figure 68 celui d'un compteur à 3 fils : on voit que chaque bobine à fil fin est montée sur un pont.

Données numériques. — Les bobines à fil fin contiennent 2×2000 à 2×4000 spires de fil de cuivre, de $0^{\text{mm}},065$ de diamètre et de résistance de 2×700 à 2×1200 ohms. La résistance supplémentaire est en fil de constantan de $0^{\text{mm}},4$ de diamètre. La résistance totale du circuit « volts » est de 4000 à 15000 ohms par 100 volts. Le circuit de l'électro de remontage a une résistance d'environ 1000 ohms par 110 volts pour le courant continu et 35 ohms pour le courant alternatif $42 \sim (^{\ast})$.

([†]) Il ne faut pas oublier que le courant ne passe que très peu de temps dans ce circuit.

Les bobines à gros fil sont en cuivre. Le nombre des ampères-tours et la section du fil varient avec le calibre. Par exemple pour 3 ampères, on a 120 spires de 1^{mm},75 de diamètre — pour 10 ampères, 45 spires de 2^{mm},75 — pour 75 ampères, 9 spires de 6 à 7 millimètres.

Chaque pendule fait, à vide, environ 12000 oscillations simples par heure. A la charge maxima, ils font \pm 1800 oscillations simples par heure de plus qu'à vide; la diff. entre les oscillations des deux pendules est donc de 3600 oscillations simples. La distance entre la face supérieure de chaque bobine fixe et la face inférieure de la bobine mobile correspondante est de 3 à 5 millimètres.

La bobine B' sert à empêcher la marche à vide. Elle est enroulée, pour cela, de façon à donner au compteur une tendance à marcher en arrière, et un cliquet empêche la marche en arrière. En charge cette bobine produit un retard, mais tout à fait insensible.

La bobine B' contient 500 spires de fil de 0^{mm},1 et de résistance totale de 25 ohms environ, ou 700 spires de résistance d'environ 35 ohms. Elle change le nombre d'oscillations du pendule, sur lequel elle agit, de 2 à 4 oscillations simples par heure.

Avantages et inconvénients. — Le compteur à balancier a l'avantage de n'avoir ni balais, ni collecteur. Les forces qui font déplacer les pendules étant assez grandes, les frottements n'interviennent pas lorsque l'appareil est en bon état. Il a l'inconvénient d'être d'une construction un peu compliquée.

II. *Compteurs oscillants*

Nous avons vu (page 71) que l'un des inconvénients des compteurs-moteurs électrodynamiques est la nécessité d'avoir un collecteur et des balais. On a cherché à éviter cet inconvénient et, en général, à éviter l'emploi de contacts glissants. L'un des moyens consiste à donner à l'équipage mobile un mouvement *oscillant*, ce qui permet de lui amener le courant à l'aide de spirales en fil fin donnant un couple négligeable.

Nous nous occuperons du compteur oscillant AEG, qui est répandu surtout en Allemagne (voir fig. 69 et 70).

Ce compteur se compose de deux parties distinctes : 1° *l'appareil de mesure proprement dit*, qui contient une bobine fixe F (fig. 69) parcourue par le courant du circuit d'utilisation, et une bobine mobile D parcourue par un courant proportionnel à la diff. de pot. aux bornes de ce circuit. Cette bobine est montée sur un axe, qui porte aussi : un disque métallique, se déplaçant dans l'entrefer d'un puissant aimant permanent, et

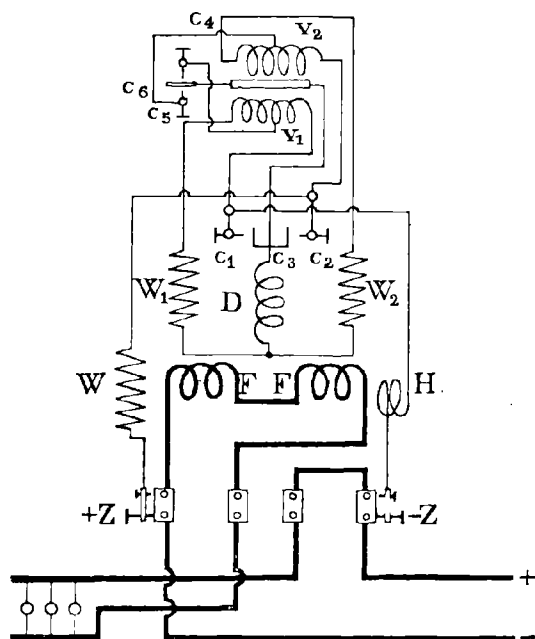


Fig. 69.

une tige métallique C_3 qui peut toucher l'un ou l'autre des deux plots fixes C_1 et C_2 . Ceci limite la course de l'équipage mobile et agit, comme nous le verrons, sur la deuxième partie de l'appareil.

2° *Le relais* se compose de deux électro-aimants U_1 et U_2 , qui attirent alternativement une armature. Celle-ci porte un contact C_6 qui touche C_4 ou C_5 — ce qui fait passer le courant dans la bobine D, dans deux sens contraires.

La même armature porte un cliquet, qui pousse sur la première roue d'un mouvement d'horlogerie et la fait avancer d'une dent, chaque fois que l'armature va dans le même sens.

Le principe de cet appareil est le suivant :

Lorsque le courant passe dans les deux bobines, il s'exerce entre eux un *couple actif* proportionnel à la puissance (comme dans un wattmètre) ; sous l'influence de ce couple la bobine D se met en mouvement, ce qui fait tourner le disque, et l'action de l'aimant donne un *couple amortisseur*

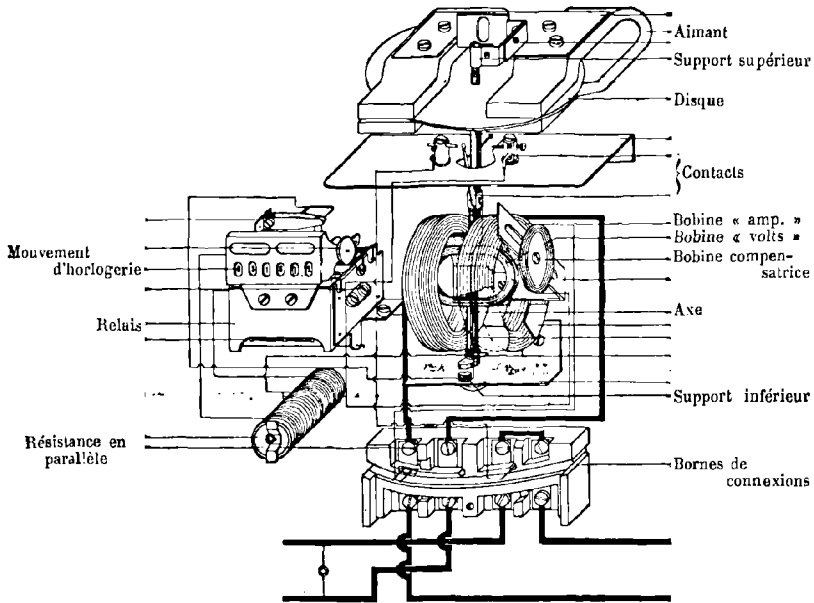


Fig. 70.

proportionnel à la vitesse angulaire (comme dans les compteurs-moteurs). Le mouvement de l'équipage étant lent (environ 60 oscillations simples par minute, pour la charge maxima) on peut, comme pour les compteurs-moteurs, admettre qu'il est uniforme, et que, par conséquent, le couple actif est égal, à chaque instant, au couple amortisseur. On a donc

$$kP = k' \cdot \frac{d\alpha}{dt},$$

d'où, en intégrant pendant une course simple :

$$k.w = k \int P dt = K\alpha,$$

w étant l'énergie qui traverse le circuit pendant la durée de la course, α l'angle de course. Lorsque l'équipage arrive à fin de course, le courant dans la bobine mobile et le couple actif changent de sens, l'équipage tourne alors dans le sens contraire et, pendant la nouvelle course, on a encore une énergie égale w . Or l'angle α est constant, il en résulte, qu'à une oscillation complète de l'équipage mobile correspond la même énergie, quelle que soit la puissance dans le circuit ⁽¹⁾.

Pendant une oscillation complète de l'équipage l'armature du relais fait aussi — comme nous le verrons — une oscillation complète et son cliquet pousse la roue d'une dent. Le mouvement d'horlogerie tourne donc d'angles proportionnels au nombre d'oscillations de l'équipage mobile et aussi, à l'énergie consommée.

Le schéma (fig. 69) permet de suivre le fonctionnement de l'appareil. Disons tout de suite, que W représente la résistance additionnelle qu'on retrouve dans tous les compteurs, W_1 et W_2 deux résistances dont nous verrons le rôle dans la suite, et que l'armature de l'électro établit le contact entre C_6 et l'un des plots C_4 ou C_5 , même lorsqu'aucun courant ne passe. Supposons que ce soit c_4 , et supposons aussi que l'équipage mobile se trouve dans une certaine position de la course ; dans ce cas la bobine D est en parallèle avec W_2 et la moitié de l'enroulement de l'électro U_2 . Introduisons maintenant le compteur dans le circuit d'utilisation. Le courant i , produit par la diff. de pot. entre $+Z$ et $-Z$, parcourt alors le circuit suivant : la résistance W , la moitié de l'enroulement de U_2 , il se dérive ensuite en deux parties, l'une passant dans D et l'autre dans l'autre moitié de U_2 , en série avec W_2 ; le courant se reforme et passe en entier dans W_1 , l'enroulement de U_1 , et enfin dans la bobine H qui sert à compenser les frottements. La résistance de la bobine mobile D étant faible devant W_2 , presque tout le courant la traversera, et

⁽¹⁾ Rappelons que, pour un compteur moteur, à un tour de l'équipage correspond la même énergie, quelle que soit la puissance.

le courant dans W_2 et dans la moitié correspondante de U_2 sera faible (environ 0,1 du courant total); l'attraction de U_1 sur l'armature prédominera de beaucoup celle de U_2 et le contact C_2, C_3 s'établit franchement. Le courant passe alors dans D dans un certain sens, qui la fait tourner vers C_1 . Lorsque D arrive au bout de la course, C_2 touche C_1 , et D est mise en court-circuit pendant un instant, en même temps que U_1 et la moitié de U_2 . L'attraction de l'autre moitié de U_2 sur l'armature existe donc pratiquement seule et C_3 quitte C_1 pour toucher C_2 . Dès que C_3 quitte C_1 , le courant passe dans U_2 , dans W_1 et dans D, dans le sens contraire du précédent, et l'équipage mobile change de sens dans son mouvement et se dirige vers C_2 . Lorsque C_3 touchera C_2 , C_3 sera de nouveau attiré vers C_1 ... et ainsi de suite.

Il faut que C_3 touche C_2 avant que C_3 quitte C_1 , autrement — on le voit sur le schéma — le courant i serait coupé et on aurait une étincelle en C_1 . Pour l'éviter, l'espace C_1, C_2 est très faible, C_3 porte deux petits ressorts et on s'arrange pour que, dès que l'un des ressorts a quitté C_1 , l'autre touche déjà C_2 .

La figure 70 donne une vue intérieure de l'appareil. Voici quelques données numériques : les appareils ont une ou deux bobines fixes, dont le nombre de tours et le diamètre du fil varient avec le courant. On a, par exemple, pour les appareils pour circuits à 2 fils : 160 spires de $1^{\text{mm}},4$ de diamètre pour les compteurs de 3 ampères ; 50 spires de $1^{\text{mm}},8$ pour les compteurs de 10 ampères ; 12 spires en fil plat de $14 \times 1,2 \text{mm}^2$ pour les appareils de 50 ampères ; 2×4 spires, formée chacune de 14 bandes de $20 \times 0,3 \text{mm}^2$ pour ceux de 300 ampères. La consommation maxima varie de 6,7 à 11 watts.

Fil fin. La résistance additionnelle W est en fil de nickel nu, de diamètre $0^{\text{mm}},05$ environ. La résistance totale du circuit est de 72Ω par volt. Les résistances W_1 et W_2 sont aussi en fil de nickel de $0^{\text{mm}},05$ et valent chacune 5 600 ohms. La bobine compensatrice H a une résistance de 200 ohms ; elle est en fil de cuivre de $0^{\text{mm}},1$ de diamètre et isolé avec une couche de soie. La bobine mobile D est en fil de cuivre de $0^{\text{mm}},07$ de diamètre, isolé à la soie et couvert de gomme-laque. Elle contient 1 000 à 2 000 spires de résistance totale de 500 à 2 000 ohms. L'axe de

rotation est formé d'un tube en aluminium. Le pivot est à bille (v. page 63).

Le disque est en aluminium de 1 millimètre d'épaisseur et 115 millimètres de diamètre.

Les bobines des électros contiennent chacune $2 \times 5\,000$ spires, de résistance 2×500 ohms, en fil de cuivre de $0^{\text{mm}},1$ de diamètre isolé à la soie.

Le fil fin absorbe environ 1,4 watt pour 100 volts.

L'équipage mobile pèse environ 60 grammes.

Le mouvement d'horlogerie est à chiffres sauteurs.

Ce compteur n'est employé qu'en courant continu.

COMPTEURS TRIPHASÉS

Lorsque les ponts sont équilibrés, on peut employer un compteur monophasé, avec point neutre (artificiel ou non) (voir page 15). Pour les compteurs électrodynamiques, on formera le point neutre à l'aide de deux résistances identiques à celle du fil fin du compteur ; pour les compteurs d'inductions, à l'aide de deux bobines de réactance identiques aux circuits à fil fin.

a) **Compteurs pour circuits à 3 fils.** — Les dispositifs adoptés aujourd'hui dérivent de la méthode des deux wattmètres (voir page 16). Cette méthode est la seule satisfaisante : elle est simple et exacte, même si le circuit n'est pas tout à fait triphasé ⁽¹⁾.

Avec les compteurs genre Thomson on peut employer deux appareils dont on ajoute les indications ; ou deux appareils qui agissent sur la même minuterie, ou dont les induits sont montés sur le même arbre.

Dans le premier cas on a à payer le prix de deux appareils, dans le

(1) On a essayé, pour les compteurs d'induction, des artifices qui tiennent compte de ce que ces f. e. m. sont triphasées (V. JANET, *Bulletin de la société des Electriciens*, Février, 1901) ; mais ces compteurs n'ont pas donné satisfaction, parce que l'hypothèse faite n'est pas suffisamment vraie dans la pratique.

second on a un équipage trop lourd. Les deux systèmes sont abandonnés.

Le compteur à balancier Aron se prête bien à l'application de cette méthode. On n'a qu'à adopter un montage identique à celui du circuit monophasé à trois fils (fig. 68).

Mais les plus employés sont les compteurs d'induction, qui se prêtent très bien à l'application de la méthode.

On peut, par exemple, se servir de deux compteurs monophasés, dont les équipages mobiles agissent sur un seul mouvement d'horlogerie, par l'intermédiaire d'un différentiel monté de façon que les nombres de tours des deux appareils s'ajoutent. C'est ce qu'on faisait par ex., dans certains compteurs d'induction Aron.

Mais le plus souvent deux stators de compteur monophasé, montés sur le circuit d'utilisation d'après la méthode des deux wattmètres, agissent sur un même disque mobile, ou sur deux disques parallèles montés sur le même arbre. Dans ce dernier cas, l'aimant permanent n'agit que sur l'un des disques.

Pour éviter les actions mutuelles entre les circuits, on écarte suffisamment les stators l'un de l'autre et, dans le cas d'un seul disque, on donne à celui-ci un grand diamètre, pour éviter que les courants induits par les deux systèmes s'influencent.

Compteur triphasé A. C. T. — Ce compteur contient un seul disque en aluminium, de 115 millimètres de diamètre et de 4 millimètre d'épaisseur. Poids de l'équipage mobile : 37 grammes environ. Couple actif : 5 à 6 grammes centimètres. Chaque bobine « ampères » a 80 à 100 ampères-tours.

Le réglage se fait avec du courant monophasé. On commence par régler l'un des systèmes en agissant sur l'aimant permanent et sur la spire en court-circuit ; ensuite l'autre, en agissant sur la spire en court-circuit, pour le réglage en circuit inductif et en faisant varier l'entrefer de l'électro-aimant, pour le réglage en circuit non inductif. Pour cela l'armature de cet électro est mobile en hauteur. On donne à chaque système la même constante, qui sera celle de l'ensemble en circuit triphasé. Pour les faibles charges, le réglage se fait sur un seul appareil.

La figure 71 donne le schéma de l'appareil et le montage.

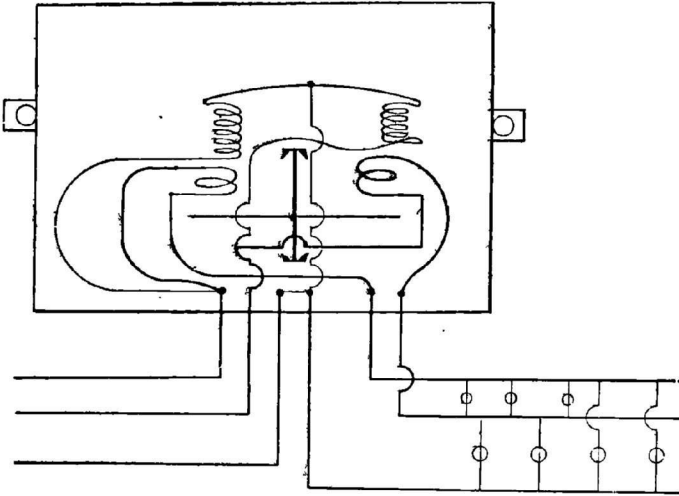


Fig. 71.

Compteur triphasé « Cosinus ». — Dans ce compteur, deux circuits

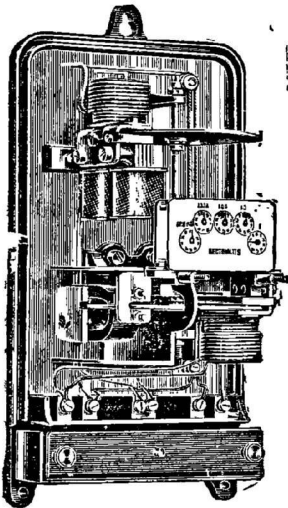


Fig. 72.

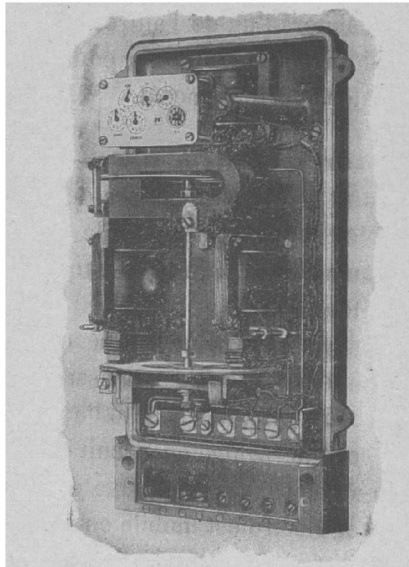


Fig 73.

magnétiques de compteur monophasé agissent sur deux disques en

aluminium montés sur le même arbre. Pour éviter les influences mutuelles, les bobines à gros fil, qui sont à circuits magnétiques ouverts, sont placées vers l'extérieur et les disques sont suffisamment éloignés l'un de l'autre.

Poids de l'équipage mobile : 80 grammes environ. Couple actif total : 5 à 6 grammes centimètres, (pour le calibre 10 ampères — 110 volts).

La figure 72 donne une vue de l'appareil ouvert.

Compteur B. T. — A peu près le même dispositif que pour le précédent. Poids de l'équipage mobile : 70 grammes. Couple actif total 8 grammes centimètres environ. Ampères-tours par bobine « ampères » : 80.

b) **Compteurs par circuits triphasés à quatre fils.** — La seule méthode rigoureuse consiste dans l'emploi de 3 compteurs, dont les

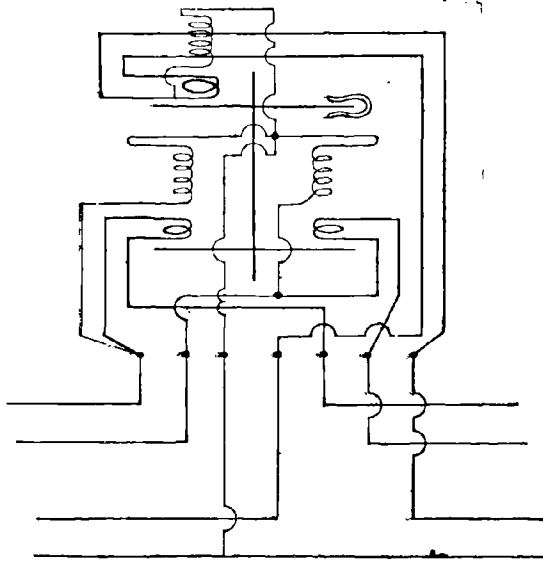


Fig. 74.

gros fils sont montés sur les trois phases et les fils fins entre chaque phase et le fil neutre — ou de systèmes équivalents. On a cherché des simplifications en employant deux appareils — ou un système équivalent — montés suivant la figure 17.

Compteur A. C. T. — Cet appareil est monté suivant la première méthode. Il contient donc trois stators, qui agissent sur deux disques en aluminium montés sur le même arbre (fig. 73 et 74).

Les compteurs « Aron » « BT » etc. sont montés suivant la deuxième méthode. On a deux stators agissant sur deux disques montés sur le même arbre.

Les types récents des compteurs « Cosinus » sont montés suivant la première méthode (fig. 74).

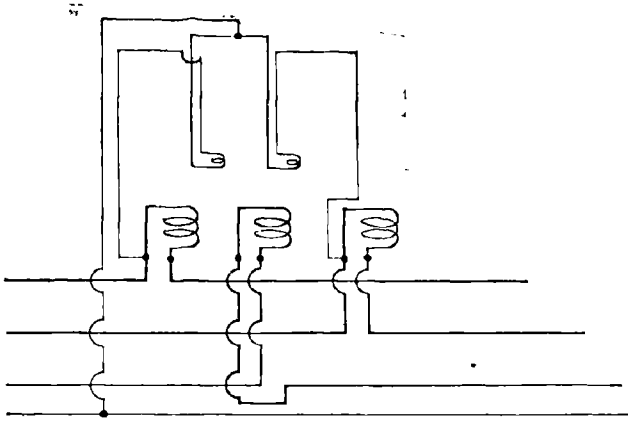


Fig. 75.

Le compteur à balancier « Aron » est monté suivant le schéma de la figure 75. Chaque bobine mobile est influencée par les deux bobines fixes entre lesquelles elle se déplace.

QUELQUES SYSTÈMES DE TARIFICATION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE. COMPTEURS SPÉCIAUX

Les conditions de production et de vente de l'énergie électrique ont donné naissance à une série de problèmes assez complexes. En ce qui concerne la production, l'électricité, contrairement à ce qui se passe pour le gaz, doit être produite presque au fur et à mesure de sa consommation ; les accumulateurs, qui sont les réservoirs d'électricité, sont trop coûteux.

insuffisamment robustes et demandent beaucoup d'entretien ; leur emploi est donc limité.

Il résulte de cette circonstance, que l'Usine Centrale a l'intérêt à faire consommer l'électricité d'une manière uniforme ; ceci lui permettrait de produire une quantité donnée d'énergie avec la plus petite puissance installée. Or, si on emploie l'électricité pour l'éclairage, on consommera surtout l'hiver, et, chaque jour, de préférence le soir ⁽¹⁾.

La figure 76 donne l'allure de la courbe de la puissance consommée en une journée d'hiver, en fonction des heures de la journée, lorsque

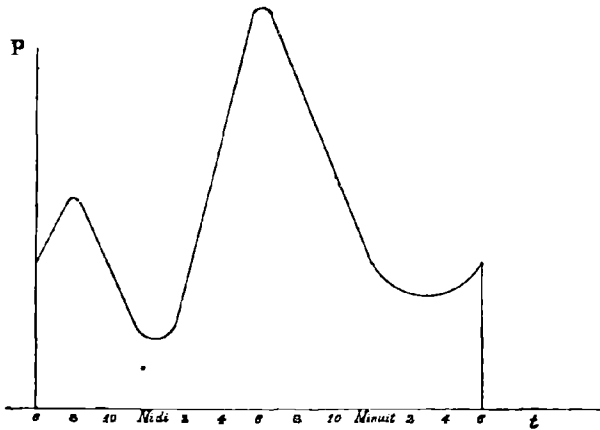


Fig. 76.

l'électricité n'est utilisée que pour l'éclairage. La puissance demandée pendant l'été est de beaucoup plus faible encore que les minima de l'hiver.

L'Usine Centrale aura donc à installer une grande puissance pour les moments de grande consommation, mais la puissance qu'elle aura à fournir la plupart du temps sera faible — d'où mauvaise utilisation des machines.

Par contre, la consommation d'électricité pour la force motrice se fait d'une manière plus uniforme et, de plus, on l'emploie surtout dans la journée, lorsqu'on a besoin de peu de lumière. Les Centrales ont donc intérêt à pousser à la consommation de la force motrice et à faire un

(1) Voir fasc. 40.

prix plus bas pour ce cas. Ceci demande l'installation chez l'abonné de deux compteurs et de deux canalisations, pour lumière et pour force motrice. On peut aussi, avec M. Meller, n'employer qu'un seul compteur, contenant deux bobines « ampères », l'une traversée par le courant pour l'éclairage, l'autre par celui pour la force motrice. Le nombre des spires des deux bobines sera proportionnel au prix des deux formes d'énergie. Le compteur indique alors de l'énergie fictive ; on peut le graduer directement en francs.

Ce système ne tient pas compte des heures de consommation ; or, l'Usine Centrale a l'intérêt de faire consommer le plus aux heures où ses machines sont moins chargées. De là est né le *tarif double* : on vend l'énergie à un prix plus bas dans la journée, entre des heures déterminées qui varient avec la saison, et plus cher le reste de la journée. Ce mode de tarification a donné naissance aux *compteurs à double tarif*.

On construit même des *compteurs à tarif multiple*, qui indiquent à chaque instant, non seulement l'énergie consommée mais le prix de cette énergie, ce prix variant avec l'heure de la journée suivant la courbe de consommation journalière de l'Usine.

MM. BROWN et ROUTIN ont imaginé un système de tarif variable, dans lequel on installe chez l'abonné un compteur spécial, qui avance plus ou moins vite suivant l'heure de la journée ; la marche du compteur est réglée par une horloge unique qui se trouve à l'Usine Centrale. MM. Brown et Routin profitent des propriétés différentes de courants continu et alternatif pour faire actionner les compteurs par l'horloge centrale, en se servant de la canalisation, sans fil spécial ⁽¹⁾.

On a imaginée d'autres systèmes de tarification, dont nous citerons le *tarif à maximum* (dans lequel on fait payer le prix de l'énergie suivant la puissance maxima qu'a employée l'abonné) et la *vente à forfait*.

La vente à forfait est le seul moyen possible pour les très petits abonnés, pour lesquels la location d'un compteur reviendrait trop cher, et qui consomment trop peu pour que l'usine puisse immobiliser un capital dans l'achat d'un compteur. Ce système est quelquefois avanta-

(1) Voir : *Industrie électrique*, 10 juin 1899. *Eclairage électrique*, 23 oct. 1897.

geux pour les petites Usines, parce qu'il leur permet de connaître d'avance le minimum de ressources annuelles de l'exploitation. Dans ce système on fait payer, soit par lampe, d'une certaine intensité lumineuse et d'un type déterminé, installée, soit qu'on limite la puissance que l'abonné peut utiliser, quelquefois aussi les heures d'utilisation. Pour que l'abonné ne puisse pas dépasser la puissance permise, on installe un petit appareil simple appelé *limiteur de courant*, qui coupe le courant lorsqu'il dépasse la valeur convenue.

Mais les Usines ont souvent été amenées à signer des contrats à forfait pour des forces motrices importantes. Dans ce cas, il est très gênant que le courant soit coupé lorsqu'on est forcé à un moment de prendre une puissance plus grande que celle à laquelle on a droit. On a donc été amené à faire une combinaison de forfait et de prix au compteur. L'abonné paye une somme fixe, quelle que soit sa consommation, à condition que la puissance qu'il emploie ne dépasse pas une valeur convenue P_1 ; mais si, à certains moments, il prend une puissance plus forte, l'énergie correspondant à l'excès de puissance est payée au kilowatt-heure. Ce système de vente a donné naissance aux *compteurs à dépassement*.

Nous parlerons aussi du *compteur à prépayement*, qui est une sorte de distributeur automatique. On met, dans une fente, une ou plusieurs pièces de monnaie et on peut avoir une quantité d'électricité correspondant à la somme déposée.

Compteur à double tarif. — Un compteur à double tarif moderne (fig. 77) se compose d'un compteur simple, d'un système quelconque, mais à deux minuterie correspondant chacune à l'un des tarifs, et d'une horloge, dont le cadran est divisé en 12 heures de jour et 12 heures de nuit. Deux indexes, qu'on peut déplacer, indiquent les heures de changement de tarif. Lorsque l'aiguille de l'horloge vient en face de l'un des indexes, un mécanisme approprié fait engrener l'axe de l'équipage mobile avec l'une ou l'autre minuterie.

Avec ce système on peut changer les heures de changement de tarif suivant les saisons et suivant les conventions particulières. On a encore

l'avantage de pouvoir se rendre compte, à chaque instant, sur quel tarif on consomme.

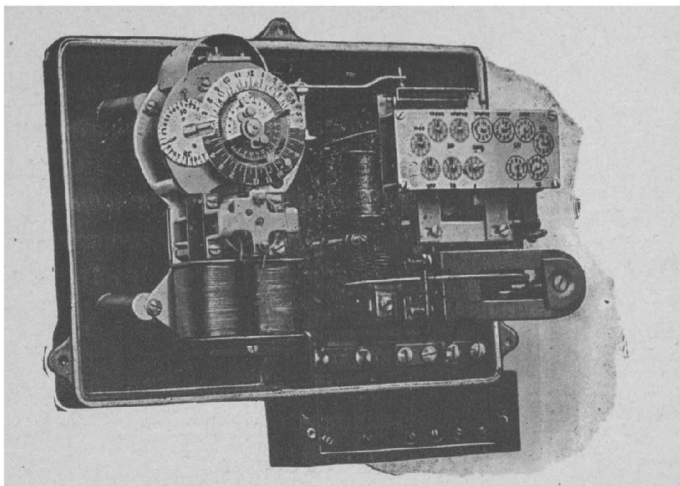


Fig. 77.

Compteurs à dépassement. — Les compteurs à dépassement peuvent être partagés en deux groupes : 1° Dans les premiers on n'a qu'un équipage mobile sur lequel on fait agir : le *couple actif* kP , proportionnel à la puissance (ou à l'intensité du courant), le *couple amortisseur* $k'\omega$, proportionnel à la vitesse et un *couple antagoniste constant*, que nous appellerons $k \cdot P_1$. On s'arrange d'ailleurs, pour que le compteur ne puisse pas marcher en arrière. L'équation du mouvement de l'équipage mobile sera :

$$k'\omega = k(P - P_1),$$

d'où

$$\alpha = \frac{k}{k'} \left[\int P dt - \int P_1 dt \right],$$

d'où il résulte, que le compteur enregistre la différence entre l'énergie totale consommée et l'énergie qui correspond à la puissance P_1 . On règle le compteur de façon que P_1 soit la puissance maxima correspondant au forfait.

De cette classe fait partie le *compteur de la C^e pour la fabrication des compteurs* (fig. 78). Il se compose d'un compteur d'un système quelconque, dont l'arbre mobile porte un cylindre en nickel, qui tourne entre les pôles d'un aimant permanent. On sait que, lorsqu'on fait tourner un corps magnétique (ici le nickel) dans un champ constant, l'énergie w_h perdue par hystérésis par tour (cycle) est constante. Or, à cette énergie w_h , correspond un couple constant donné par $c_a = \frac{w_h}{2\pi}$; c'est le *couple antagoniste* que nous avons appelé $k \cdot P_1$. Le réglage de c_a , ou de w_h , se fait en déplaçant l'aimant en hauteur : une partie plus ou moins grande du

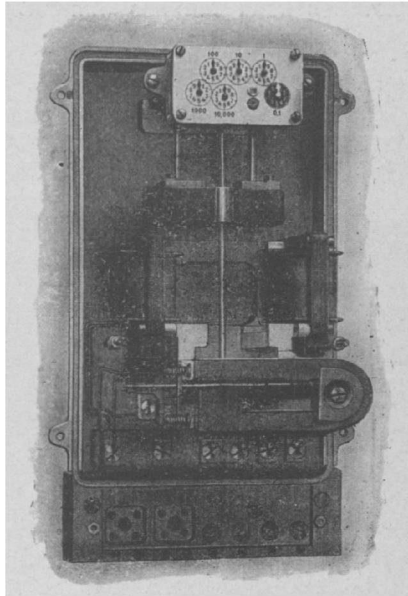


Fig. 78.

cylindre se déplace dans le champ, d'où, pertes par hystérésis différentes.

2° Dans la deuxième classe de compteurs à dépassement, on fait agir sur la même minuterie et par l'intermédiaire d'un différentiel, deux équipages mobiles. L'un est l'équipage d'un compteur habituel, l'autre un mobile à vitesse constante. Un cliquet empêche le compteur de décompter. La minuterie ne marquera donc que lorsque l'équipage du compteur

marchera plus vite que le mobile à vitesse constante, et il ne marquera que la différence des deux mouvements.

On règle le mobile à vitesse constante, de façon que le compteur marque dès que la puissance consommée dépasse le forfait. Nous décrirons le *compteur à dépassement « Cosinus » triphasé* (fig. 79). Le mobile à vitesse constante est un disque de compteur d'induction sur lequel agissent deux systèmes de bobines. Les bobines F et G, dont l'une est à faible, l'autre à forte réactance, sont montées en parallèle entre elles, et l'ensemble est parcouru par le courant principal I. Elles sont donc parcourues par des courants proportionnels à I, mais décalés l'un par rapport à l'autre. Ces deux bobines donnent naissance à deux champs h_1 et h_2 , proportionnels tous deux à I et décalés entre eux. On

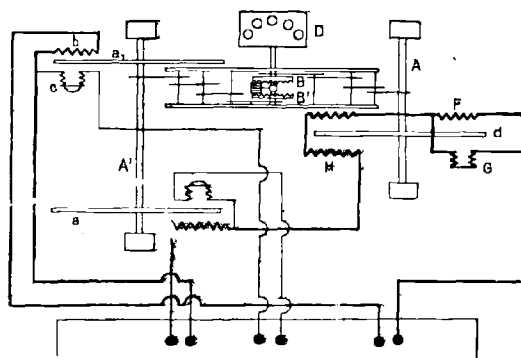


Fig. 79.

sait, (voir, page 83) que de tels champs donnent un couple actif proportionnel au produit de leurs maxima, donc $= k \cdot I_{\text{eff}}^2$ — et à un couple antagoniste proportionnel à la somme de leurs carrés et à la vitesse de rotation ω' , c'est-à-dire à $\omega' I_{\text{eff}}^2$. On complète ce dernier couple par un couple, proportionnel aussi à $\omega' I_{\text{eff}}^2$, donné par un système de bobines H parcourues par le courant I. Le couple antagoniste total sera donc $k' \omega' I_{\text{eff}}^2$. Le mobile prendra une vitesse de rotation, correspondant à : $k I_{\text{eff}}^2 = k' \omega' I_{\text{eff}}^2$, c'est-à-dire une vitesse constante. Cette vitesse peut être réglée en agissant sur le couple $k' \omega' I_{\text{eff}}^2$, pour cela les bobines H sont montées sur glissières et peuvent être déplacées.

Ce compteur est exact dès que le forfait dépasse le $1/3$ de la puissance, pour laquelle il est construit.

Compteurs à prépayement ou automatiques. — Il existe de nombreux systèmes de ces compteurs. Nous allons décrire, à titre d'exemple, le système Berland ⁽¹⁾, (fig. 80 et 80^{bis}).

Un compteur de système quelconque commande une des roues d'un différentiel, l'autre roue étant commandée par le dispositif à prépayement. Celui-ci contient un disjoncteur dont l'électro E a son fil en série avec un interrupteur $c_1 c_2$ monté sur la diff. de pot. de l'installation. Un

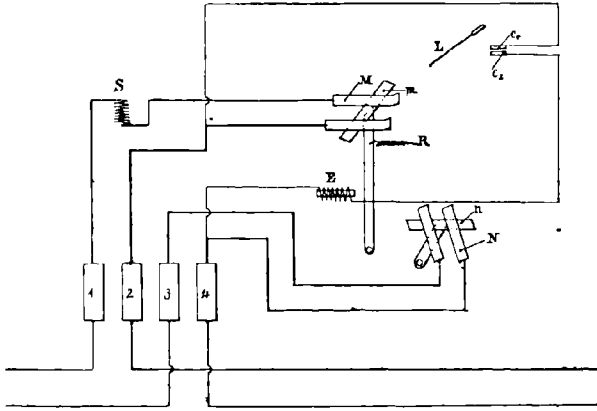


Fig. 80.

interrupteur N non automatique permet de couper et de remettre le courant tant que le disjoncteur est fermé ; mais, pour cela, il faut que $c_1 c_2$ soit coupé, autrement E attire le disjoncteur et l'empêche de se fermer.

Avant que l'appareil fonctionne, $c_1 c_2$ est fermé par le levier E, qui presse sur c_1 . Si on introduit une pièce dans la fente F, et qu'on fait tourner la mannette A dans le sens de la flèche jusqu'à ce qu'on entende la pièce tombée, la pièce entraîne une roue à rochet, qui, au moyen des roues intermédiaires, fait tourner le satellite du différentiel de $1/30$ de tour, ce qui écarte L de c_1 et coupe le courant dans E. En faisant alors

(1) Construit par la C^{ie} pour la fabrication des compteurs et par la C^{ie} de Construction électrique.

tourner B dans le sens de la flèche, jusqu'à ce qu'il bute complètement, on ferme le disjoncteur ; si on fait tourner B dans le sens contraire, on peut fermer l'interrupteur N et avoir du courant ⁽¹⁾.

Si, avant de toucher à B, on introduit dans la fente F successivement plusieurs pièces, qu'on fait tomber, le levier L s'écarte de c_1 d'un angle égal supplémentaire pour chaque pièce.

Lorsqu'on consomme de l'électricité, le compteur tourne et tend à ramener le levier L dans sa position primitive, c'est-à-dire à fermer c_1 , c_2 et à couper le disjoncteur. L'angle dont doit tourner L étant propor-

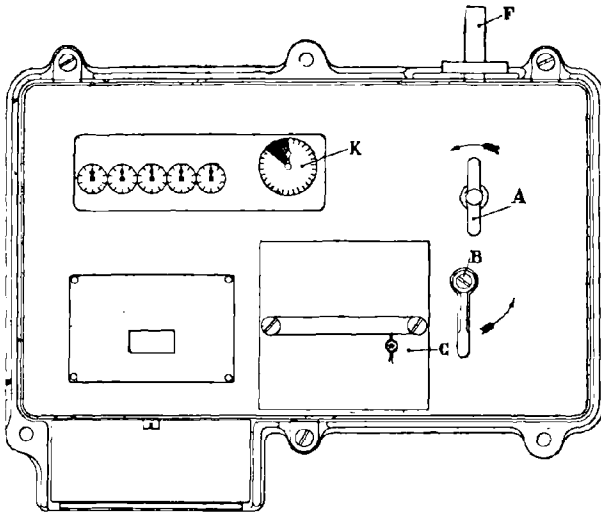


Fig. 80 bis.

tionnel au nombre de pièces introduites, le courant ne sera coupé que lorsqu'on aura consommé une quantité d'énergie proportionnelle à ce nombre.

Le nombre de pièces à introduire est limité, parce que, si on en introduisait trop, L arriverait à faire un tour et en touchant c_2 fermerait le

(1) Si on ne mettait pas de pièce dans F et qu'on ferait tourner B, on fermerait le disjoncteur, mais lorsqu'on reviendrait en arrière pour fermer N, le disjoncteur s'ouvrirait, parce qu'il serait attiré par E.

contact c_1, c_2 et le disjoncteur sauterait. Comme on ne peut pas faire revenir L en arrière sans ouvrir le compteur, les pièces non utilisées seraient perdues.

On indique sur chaque compteur le nombre de pièces qu'on peut utiliser, et aussi le nombre de pièces qui restent encore disponibles dans l'appareil après consommation.

CHAPITRE IV

Mesure d'un facteur de puissance et d'une différence de phase. Phasemètres

Définition et formule.— I. Le *facteur de puissance* k , dans un circuit monophasé à deux fils, est défini par : $k = \frac{P}{U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}}$, P étant la puissance, U_{eff} et I_{eff} les valeurs efficaces de la diff. de pot. et du courant. Le produit $U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$ s'appelle *puissance apparente*. Dans les circuits à plusieurs ponts, ou dans les circuits polyphasés, on peut définir, comme précédemment, le facteur de puissance par pont ou par phase. Pour un circuit triphasé équilibré le facteur de puissance global est donné par : $k = \frac{P}{U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \sqrt{3}}$, P étant la puissance totale, U_{eff} la diff. de pot. entre deux phases (diff. de pot. composée), I_{eff} le courant par phase.

Ces définitions sont indépendantes de la forme des courants et des diff. de pot.

II. Si nous considérons deux *fonctions sinusoïdales*.

$$x = X \sin \omega t \quad \text{et} \quad y = Y \sin (\omega t - \varphi),$$

l'angle φ est la *différence de phase* entre x et y . Si on trace deux courbes en prenant t en abscisses et x ou y en ordonnées, on voit facilement qu'on a :

$$(50) \quad \varphi = \omega \tau,$$

τ étant la distance de deux zéros homologues. Cette remarque permet de définir par la relation (50) la diff. de phase entre deux fonctions alternatives quelconques, dont les zéros homologues sont à une distance constante τ .

D'après leurs définitions même, il ne peut y avoir, en général, de relation entre k et φ . Pourtant si x et y sont respectivement la diff. de pot. et le courant sinusoïdaux d'un même circuit monophasé, on a :

$$(51) \quad k = \cos \varphi.$$

Dans la pratique on appelle souvent, dans le cas indiqué, *angle de phase* entre le courant et la diff. de pot., l'angle φ défini par la relation (51), même lorsque les courants ne sont pas sinusoïdaux.

Comme l'a fait remarquer M. Chaumat (1), on a, dans la plupart des cas de la pratique et avec une grande approximation : $k = \cos \varphi_1$, φ_1 étant la différence de phase entre les harmoniques principales du courant et de la diff. de pot.

Mesure d'un facteur de puissance. — Il suffit de mesurer W à l'aide d'un wattmètre, et U_{eff} et I_{eff} à l'aide d'un voltmètre et d'un ampèremètre donnant les valeurs efficaces — et d'appliquer les formules de définition.

Dans les circuits triphasés à 3 fils équilibrés, et pour les courants sinusoïdaux, on peut déduire k ou $\cos \varphi$ des indications des wattmètres dans la méthode des deux wattmètres. On a en effet, dans ce cas, (voir page 17) : $P_1 = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos (30^\circ - \varphi)$ et $P_2 = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos (30^\circ + \varphi)$, d'où l'on déduit :

$$P_1 - P_2 = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} [\cos (30^\circ - \varphi) - \cos (30^\circ + \varphi)] \\ = 2 U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \sin 30^\circ \sin \varphi = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \sin \varphi,$$

et

$$P_1 + P_2 = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} [\cos (30^\circ - \varphi) + \cos (30^\circ + \varphi)] \\ = 2 U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos 30^\circ \cos \varphi = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \sqrt{3} \cdot \cos \varphi,$$

d'où

$$(52) \quad \tan \varphi = \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \sqrt{3}.$$

(1) Cité par M. JANET, *Op. cit.*, Tome II, p. 133, Ed. JJ.

On peut aussi se servir d'un seul wattmètre, dont le gros fil serait monté sur une phase et le fil fin, successivement, entre cette phase et

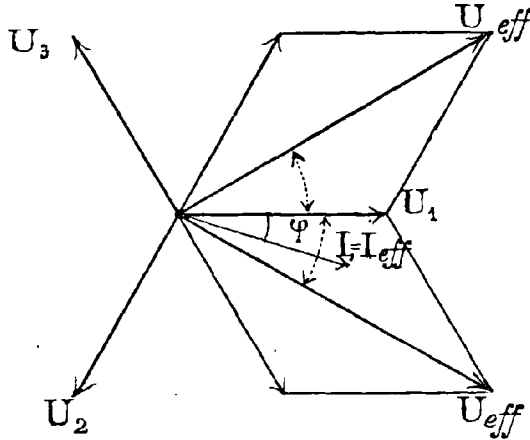


Fig. 81.

chacune des autres (fig. 82). On a alors, d'après le diagramme (fig. 81), si P_1 et P_2 sont les indications successives du wattmètre :

$$P_1 = U_{eff} I_{eff} \cos(30^\circ - \varphi) \quad \text{et} \quad P_2 = U_{eff} I_{eff} \cos(30^\circ + \varphi)$$

d'où on déduit une relation identique à (52).

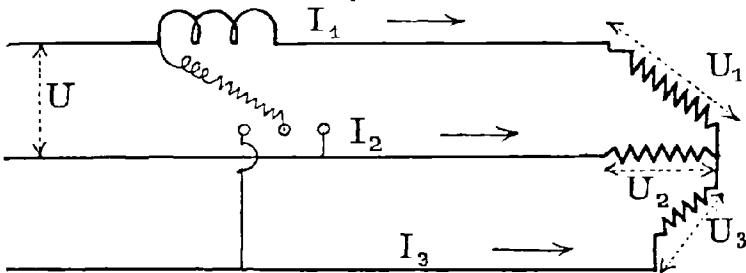


Fig. 82.

Dans la pratique on applique ces formules dans tous les cas, et $k = \cos \varphi$ représente un facteur de puissance moyen, approximatif.

Mesure d'un angle de phase entre deux courants, entre un courant et une diff. de pot. ou entre deux diff. de pot., faisant partie du même circuit ou de deux circuits différents. — 1° On trace les courbes des

deux éléments sur les mêmes axes (voir pages 140 et suiv.) et on mesure la distance entre leurs zéros.

2° On fait passer les deux courants (ou, dans le cas des diff. de pot., des courants proportionnels et en phases avec elles) dans les deux enroulements d'un électrodynamomètre. Celui-ci donne : $I_{eff} \cdot I'_{eff} \cdot \cos \varphi$, I_{eff} et I'_{eff} étant les valeurs efficaces des deux courants, φ la diff. de phase cherchée. On mesure ensuite I_{eff} et I'_{eff} par deux ampèremètres. Une méthode semblable a été indiquée par Blakesley. Elle n'est rigoureuse que pour les courants sinusoïdaux.

Phasemètres. — Les phasemètres sont des appareils qui indiquent l'angle de phase φ , ou une fonction de cet angle : $\cos \varphi$, $\tan \varphi$, etc. Ils ne sont rigoureusement exacts que pour des courants sinusoïdaux.

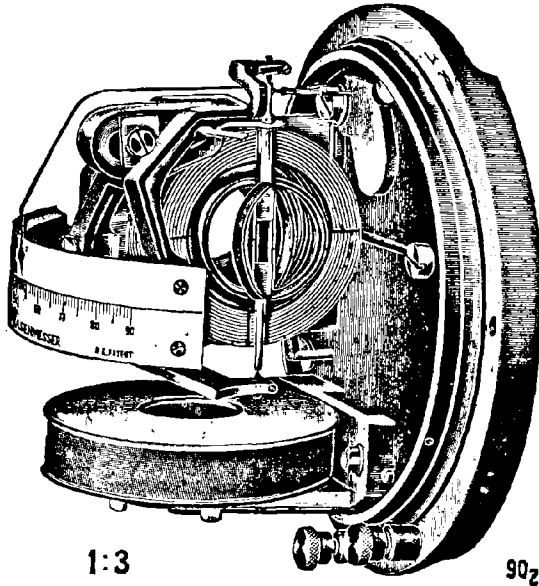


Fig. 83.

Phasemètre Hartman et Braun (fig. 83). — Cet appareil donne l'angle de phase entre un courant et une diff. de pot. Il se compose d'une bobine fixe parcourue par le courant, et d'un système mobile formé de quatre bobines semicirculaires, dont les parties droites sont fixées à l'axe de rotation.

Deux de ces bobines, 1 et 2, perpendiculaires entre elles, sont montées en série avec une résistance non inductive, leurs connexions étant telles que la bobine fixe exerce sur leurs courants des couples électrodynamiques de même sens. Les deux bobines, 1 et 3, sont aussi en série entre elles et avec une résistance fortement inductive; elles sont enroulées de façon que la bobine fixe exerce sur leurs courants des actions de sens contraires.

Les deux circuits ainsi formés sont montés en parallèle entre eux, et le tout, en série avec une très grande résistance non inductive ⁽¹⁾, est

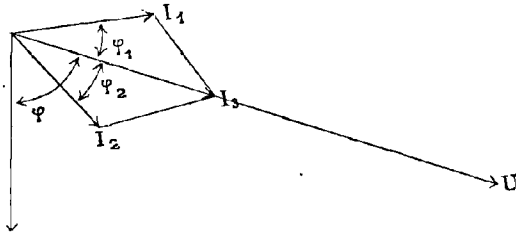


Fig. 84.

monté sur la diff. de pot. Le diagramme de la figure 84 est immédiat et on voit, que \$I_1\$ sera en avance sur \$I_3\$ d'un angle, que nous appelons \$\varphi_1\$, et \$I_2\$ en retard d'un angle \$\varphi_2\$. Le courant \$I\$ dans le circuit principal étant décalé de \$\varphi\$ sur \$U\$, sera décalé de \$\varphi + \varphi_1\$ par rapport à \$I_1\$ et de \$\varphi - \varphi_2\$ par rapport à \$I_2\$. Les couples électrodynamiques moyens qui s'exercent entre la bobine fixe et chacune des bobines mobiles sont :

$$n_1 f(\alpha) \cdot \Pi_1 \cos(\varphi + \varphi_1), \quad n_2 f\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) \Pi_1 \cos(\varphi + \varphi_2),$$

$$n_2 f(\alpha) \cdot \Pi_2 \cos(\varphi - \varphi_2) \quad \text{et} \quad -n_2 f\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) \Pi_2 \cos(\varphi - \varphi_2),$$

\$n_1\$ et \$n_2\$ étant, respectivement, le nombre des spires des bobines 1 et 3, et de 2 et 4, \$\alpha\$ l'angle de déviation.

Le couple total sera nul pour la position d'équilibre, ce qui donne :

$$n_1 f(\alpha) \left[\cos(\varphi + \varphi_1) + \cos(\varphi - \varphi_2) \right] = n_2 f\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) \left[\cos(\varphi + \varphi_1) - \cos(\varphi - \varphi_2) \right].$$

⁽¹⁾ Cette résistance doit être très grande pour qu'on puisse considérer que le courant qui la traverse est en phase avec la diff. de pot. totale.

Si on s'arrange pour avoir $\varphi_1 = \varphi_2$, la formule précédente deviendra :

$$\text{tang } \varphi = F(x) \cdot \text{tang } \varphi_1.$$

La déviation α de l'équipage mobile sera donc fonction de φ si φ_1 reste constant ; ce qui arrive si la fréquence est constante.

L'équipage mobile est monté sur pivot ; les fils d'amené du courant donnent un faible couple antagoniste — négligeable dans les limites pratiques d'emploi de l'appareil.

Dans les appareils de laboratoires, pour que le même phasemètre puisse servir pour des fréquences différentes, on y ajoute un *régulateur*

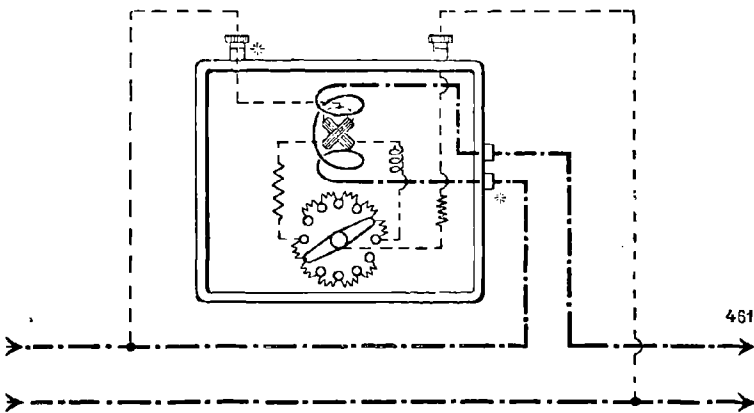


Fig. 84 bis.

de fréquence, qui est un double rhéostat servant à introduire dans les circuits mobiles des résistances appropriées de façon qu'on ait toujours $\varphi_1 = \varphi_2$ et que $\text{tang } \varphi_1$ garde la même valeur (fig. 84^{bis}).

Phasemètres donnant $I \sin \varphi$ ⁽¹⁾. — Les Usines Centrales ont l'intérêt de connaître le facteur de puissance, parce que, si il est trop petit, leurs alternateurs sont mal utilisés, étant donné que pour un fort courant ils ne fournissent qu'une faible puissance. Ce qui diminue le facteur de puissance, c'est la présence du courant dévatté $I \sin \varphi$. Il est donc intéressant de pouvoir le mesurer.

(¹) Ce sont des ampèremètres à courant dévatté.

Pour cela on peut se servir d'un wattmètre électrodynamique, dont le fil fin est en série avec une bobine ayant une forte réactance ; ou d'un wattmètre d'induction dont le circuit à fil fin a une réactance négligeable.

Dans les deux cas, ces appareils mesurent $UI \cos \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) = UI \sin \varphi$ et comme U est constant, on peut les graduer en $I \sin \varphi$.

Le phasemètre de la C^{ie} A. E. G., par exemple, est un wattmètre d'induction dont le fil fin a une réactance négligeable ; de même pour le phasemètre Dolivo-Dobsowalski, etc.

CHAPITRE V

Mesure d'une fréquence. Fréquencemètres.

La fréquence du courant d'un alternateur est donnée par :

$$(53) \quad F = p \cdot \frac{N}{60},$$

p étant le nombre de paires de pôles de l'inducteur, N le nombre de *tour par minute* du rotor.

Si on veut connaître la fréquence du courant d'un réseau, dont on n'a pas les alternateurs sous la main, on peut monter sur ce réseau un petit moteur synchrone, auquel on appliquera la formule (53). Mais d'habitude on se sert des *fréquencemètres*, dont nous décrivons deux types très différents.

Fréquencemètre Hartmann et Braun.— Cet appareil, l'un des plus anciens, est une application de la *résonnance*. Un certain nombre de lames élastiques en acier (fig. 85) ayant chacune une période propre appropriée, se trouvent devant les pôles d'un électro-aimant, dont l'enroulement est monté sur la diff. de pot. du circuit dont on veut mesurer la fréquence. Chaque lame est terminée par un petit voyant blanc, qui se trouve devant un trait d'une graduation, en alternance (1) ou demi-alternance, correspondant aux périodes propres des lames vibrantes.

(1) Le nombre d'alternances d'un circuit est le double de la fréquence.

Lorsque l'électro est excité, il fait vibrer très faiblement toutes les lames, mais la lame qui est en *résonnance* avec le courant, vibre très fortement et se distingue nettement des autres. Les indications de l'appareil sont indépendantes de la tension.

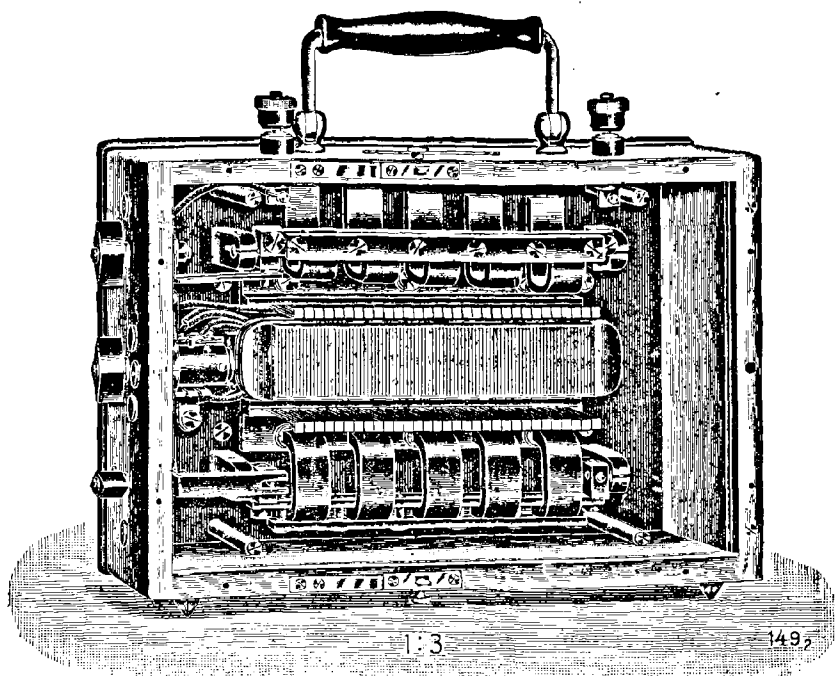


Fig. 85.

Il existe aussi des fréquencesmètres doubles, permettant de se rendre compte de l'égalité de deux fréquences et qui peuvent servir, par exemple, pour le couplage des alternateurs.

Fréquencesmètre Abraham (1). — Cet appareil se compose d'un cadre mobile, analogue à celui d'un wattmètre, monté en série avec la bobine d'un électro-aimant sur lequel on dérive un condensateur (fig. 86). Le cadre, qui tourne sur pivots, est placé dans le champ de l'électro-aimant ;

(1) Construit par Carpentier.

le courant est amené au cadre par des fils très fins qui donnent un compte négligeable.

Le principe du fonctionnement de cet appareil est le suivant : La capacité et le coef. de self de l'électro sont réglés à la résonance, pour une certaine fréquence (par exemple la fréquence normale du circuit considéré). Dans ce cas, le courant dans le cadre est en quadrature avec celui de l'électro-aimant et le cadre reste dans la position pour laquelle

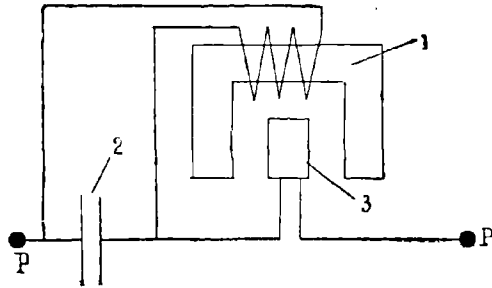


Fig. 86.

l'électro ne lui envoie aucun flux. Mais si la fréquence change, le décalage entre les deux courants devient différent de $\frac{\pi}{2}$.

L'électro-aimant agit alors sur le cadre et le fait tourner, jusqu'à ce qu'il prenne une position telle, que le courant qui y est induit par le champ de l'électro-aimant et le courant préexistant donnent un courant résultant, en quadrature avec ce champ. C'est une position d'équilibre qui caractérise la nouvelle fréquence ; celle-ci se trouve marquée sur la gradation.

Cet appareil consomme environ 0,01 amp.

Le fréquencesmètre enregistreur Abraham diffère un peu du précédent, mais résulte du même principe général.

CHAPITRE VI

Tracé et étude des courbes de courant alternatif. Facteur de forme

On sait que la fonction périodique la plus simple est la *sinusoïde*, et que tout autre fonction périodique peut être considérée comme une somme de fonctions sinusoïdales, de périodes sousmultiples de celle de la fonction (Série de Fourier).

On a :

$$y = A_0 + A_1 \sin \left(\frac{2\pi}{T} t + \Psi_1 \right) + A_2 \sin \left(\frac{2\pi}{T} t + \Psi_2 \right) + \dots \\ + A_n \sin \left(\frac{2n\pi}{T} t + \Psi_n \right) + \dots,$$

y étant la fonction périodique considérée, T sa période, $A_0, A_1, \dots, A_n, \Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_n$ des constantes appropriées.

Si la fonction est *alternative*, le terme constant A_0 manque et l'expression précédente devient :

$$(54) \quad y = A_1 \sin(\omega t + \Psi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \Psi_2) + \dots + A_n \sin(n\omega t + \Psi_n) + \dots$$

en posant $\frac{2\pi}{T} = \omega$; ω est la *pulsation* du courant alternatif.

Les termes du développement (54) s'appellent les *harmoniques* de la fonction y ; par exemple $A_n \sin(n\omega t + \Psi_n)$ est le $n^{\text{ième}}$ harmonique. Le terme $A_1 \sin(\omega t + \Psi_1)$ s'appelle aussi : le *terme principal*.

Il est souvent intéressant de connaître la forme des courbes de tension, ou de courant; par exemple, dans le cas des distributions d'énergie électriques très étendues et à haute tension, les capacités et les réactances des circuits peuvent faire résonner certaines harmoniques et produire des surtensions dangereuses (1). Les constructeurs cherchent à obtenir des alternateurs à f. e. m. sinusoïdales. Pour arriver à trouver les meilleurs artifices, ils doivent pouvoir relever la courbe de tension de ces alternateurs — et aussi en trouver les harmoniques, c'est-à-dire *analyser* les courbes.

Facteur de forme. — On appelle *facteur de forme* d'une fonction périodique y , le rapport f entre sa valeur efficace Y_{eff} et sa valeur moyenne : $Y_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T |y| dy$ (2). On a donc $f = \frac{Y_{\text{eff}}}{Y_{\text{moy}}}$. Pour un courant sinusoïdal, on a $f = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11\dots$

Tracé d'une courbe de tension, d'intensité, etc. d'un courant alternatif. — On peut employer des *méthodes directes*, qui consistent à faire inscrire par un appareil la courbe vraie, ou des *méthodes indirectes*, dans lesquelles on inscrit une courbe moyenne, en prenant un point de chaque courbe réelle. Les premières méthodes sont plus correctes, les deuxièmes plus commodes.

Les méthodes indirectes sont les plus anciennes et dérivent de celle employée par Joubert 1881 et ensuite par Blondel, sous une forme plus pratique. On inscrit, dans ces méthodes, une diff. de pot. La figure 87 donne le schéma d'un dispositif simple : un commutateur c formé d'un disque isolant D , d'une couronne métallique E et d'une petite languette métallique F , peut tourner autour d'un axe O . Sur la couronne métallique frotte un balais b_3 , sur le disque isolant deux balais b_1 et b_2 . Un condensateur C et un balistique B sont montés comme l'indique la

(1) Voir JANET, *Op. cité*, Tome II.

(2) $|y|$ = Valeur absolue de y .

figure. On fait tourner le commutateur c d'un mouvement uniforme, de vitesse égale à la fréquence de la diff. de pot. à inscrire ⁽¹⁾.

A chaque tour, donc une fois par période, lorsque le contact F touche le balais b_1 le condensateur C se charge à la valeur de la diff. de pot. U à cet instant ; ensuite, lorsque F touche b_2 , le condensateur se décharge dans le balistique. Celui-ci, de période assez grande et convenablement amorti, recevra une série de décharges égales et donnera une déviation

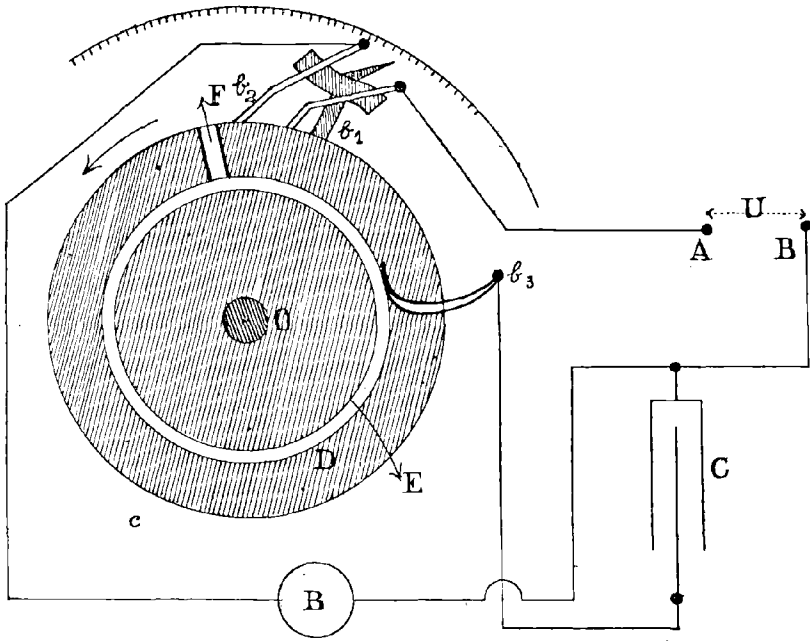


Fig. 87.

permanente proportionnelle à la valeur instantanée de U . En déplaçant les balais b_1 et b_2 (solidaires mécaniquement mais électriquement bien isolés entre eux) on peut obtenir une série de valeurs instantanées de U et on peut tracer une courbe ayant en abscisse les positions des balais ⁽²⁾ et en ordonnées les valeurs de U ou les déviations.

(1) Pour cela on le monte sur l'arbre de l'alternateur, ou on le met en relation avec celui-ci par l'intermédiaire d'engrenages, ou encore on le monte sur l'arbre d'un petit moteur synchrone alimenté par la diff. de pot. à inscrire ou par un courant de même fréquence.

(2) Ces abscisses représentent, à l'échelle près, le temps.

On peut faire tourner le commutateur c à une vitesse n fois plus petite que la fréquence ; dans ce cas, avec un seul contact F on ne charge le condensateur que une fois par n périodes ; si on veut le charger une fois par période, on doit disposer sur le disque isolant D , n languettes F uniformément réparties sur la périphérie.

Pour tracer une courbe d'intensité d'un courant, on trace la courbe de la diff. de pot. aux bornes d'une résistance non inductive traversée par ce courant.

Ondographe Hospitalier ⁽¹⁾ (fig. 88). — Cet appareil est une application ingénieuse de la méthode Joubert ; il inscrit automatiquement la

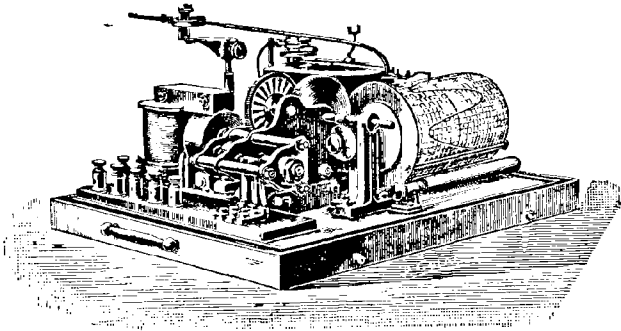


Fig. 88.

forme de la courbe, sur une feuille de papier enroulée sur un cylindre.

Le commutateur tournant (fig. 88^{bis}) se compose d'un cylindre isolant, couvert d'une feuille métallique, découpée de façon qu'on ait à l'une des extrémités une bande métallique étroite et à l'autre, une bande isolante un peu plus large que la précédente. La figure indique suffisamment la position des balais b_1 , b_2 , b_3 , et le montage du condensateur C et du balistique B .

Ce commutateur est relié à un moteur synchrone, par l'intermédiaire d'un train d'engrenages, arrangé de façon que le commutateur fasse 999 tours pendant que le moteur fait 1 000 tours — d'où un glissement de 0,1 %. Le même moteur, par engrenage et vis sans fin, donne un

(1) Construit par la C^{ie} pour la fabrication des Compteurs.

mouvement uniforme au cylindre enregistreur, qui fait $1/3$ tour pour les 1 000 tours du moteur. Le balistique porte une aiguille ; celle-ci produit le déplacement d'une aiguille plus longue, qui sert à l'inscription.

Le fonctionnement de l'appareil est le suivant : lorsque le balais b_1 touche la bande métallique, le condensateur se charge, et ensuite pendant tout le temps que b_2 touche la partie métallique, il se décharge dans le balistique (¹). A cause du glissement du collecteur chaque charge se fait en un point différent du précédent de 0,001 de période. Le balistique reçoit donc une série de décharges peu différentes l'une de l'autre et qui

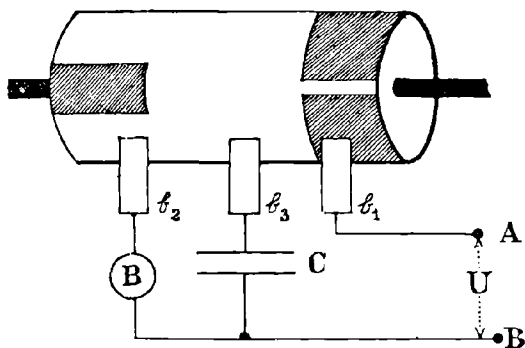


Fig. 88 bis.

suivent une loi identique à celle de la diff. de pot. à inscrire, mais de période 1 000 fois plus grande.

La période du balistique étant grande par rapport à celle de la f. e. m. et faible par rapport à la période du nouveau phénomène, le balistique se comportera comme si il était parcouru par un *courant périodique de période très grande par rapport à la sienne* ; il suivra la variation de ce courant fictif (voir fascicule 21, page 26) et l'aiguille l'inscrira, c'est-à-dire inscrira la courbe de la diff. de pot.

L'ondographe et les autres appareils, dans lesquels on applique la méthode Joubert, ont l'avantage d'être facilement maniables et d'inscrire

(¹) Il faut que b_1 et b_2 ne se trouvent jamais en même temps sur la partie métallique, parce qu'on aurait alors la diff. de pot. U fermée en court-circuit sur le balistique.

directement les courbes ; mais ils ont l'inconvénient de ne donner qu'une courbe moyenne, ne prenant qu'un point de chacune des courbes réelles. De plus les charges et décharges du condensateur peuvent ne pas être complètes.

Par contre les *oscillographes* et *rhéographes*, dont nous allons décrire deux modèles, donnent la courbe réelle ; mais ils sont beaucoup plus délicats. De plus, dans ces appareils on se sert de la photographie pour avoir le tracé.

Chaque fois qu'il s'agira seulement de connaître la forme de la courbe, on aura recours à l'ondographe ou à des appareils similaires ; mais pour avoir des résultats précis, surtout lorsqu'il s'agit d'analyser les courbes, il vaut mieux employer l'oscillographe ou le rhéographe.

Oscillographes. — Les parties essentielles des oscillographes sont des galvanomètres, à période très courte (T_0 est de l'ordre de 0,0002 de seconde) et dont l'amortissement est un peu plus petit que l'amortissement critique. D'après ce qu'on a vu (fascicule 21, page 26) la déviation d'un tel galvanomètre sera, à chaque instant, proportionnelle au courant qui le traverse, à condition que la période de ce courant soit grande par rapport à celle de l'appareil, ce qui arrive pour les courants industriels, dont la période est de l'ordre de 0,02 de seconde.

Les premiers appareils sont ceux de M. Blondel, construits par Carpentier. Nous décrirons l'oscillographe à *fer doux* et l'*oscillographe bifilaire*.

L'équipage mobile de l'oscillographe à fer doux est formé d'une bande en fer, mince et étroite, (section $\pm 0,5 \times 0,025 \text{ mm}^2$) tendue sur un chevalet et portant en son milieu un petit miroir ($0,5 \times 1$ millimètre carré) ; le tout étant placé dans un tube en cristal rempli d'huile, qui sert à l'amortissement. Des petites pièces en fer doux concentrent sur la lame les lignes de force d'un puissant aimant permanent (fig. 89). Deux bobines (en fil fin pour le voltmètre, en bande pour l'ampèremètre) sont placées de façon que leur axe commun soit perpendiculaire à la direction des pôles de l'aimant.

Si aucun courant ne passe dans les bobines, la bande en fer doux est parallèle au champ \mathcal{H} de l'aimant, mais dès que les bobines sont parcourues par un courant, constant ou variable, le champ h créé par

elles se combine avec celui des aimants, pour donner un champ résultant \mathcal{H}' , faisant avec \mathcal{H} un angle α tel que $\text{tang } \alpha = \frac{h}{\mathcal{H}}$ (fig. 90). La bande en fer doux ayant une période très courte, prendra, à chaque instant, la direction du champ résultant ; elle aura donc une déviation α . Dans ces appareils, l'angle α est très petit, on peut donc le confondre

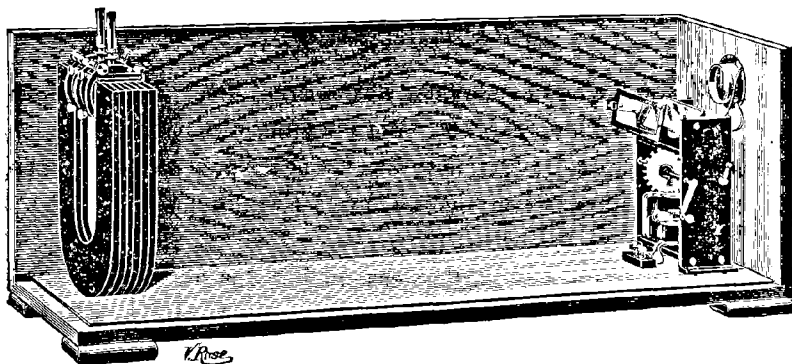


Fig 89.

avec sa tang. ; comme d'autre part le champ h est proportionnel au courant dans les bobines on aura, en *définitive*,

$$(55) \quad \alpha = k \cdot i.$$

Dans l'*oscillographe bifilaire*, l'équipage mobile se compose d'un ruban en bronze formant deux brins, tendus l'un à côté de l'autre, sur des chevalets isolés ; on a ainsi une sorte de cadre de galvanomètre, réduit à sa forme la plus simple. Un tout petit miroir est fixé au milieu des deux fils. Lorsque le courant à étudier — ou une dérivation de celui-ci — passe dans ces fils, l'ensemble prend une torsion proportionnelle au courant instantané.

Les fils ne supportent qu'un courant inférieur à 0,1 amp. ; pour les courants supérieurs on emploie des shunts.

L'*oscillographe à fer doux « voltmètre »* donne une déviation de 30 à 40 millimètres pour 1 ampère, sur une échelle située à environ 1 mètre, pour une période propre de 0,0002 de seconde. Dans les mêmes conditions le bifilaire donne 300 millimètres par ampère. On peut aussi rem-

placer l'aimant permanent par un électro-aimant ; il est alors facile d'obtenir, 1 000 millimètres par ampère.

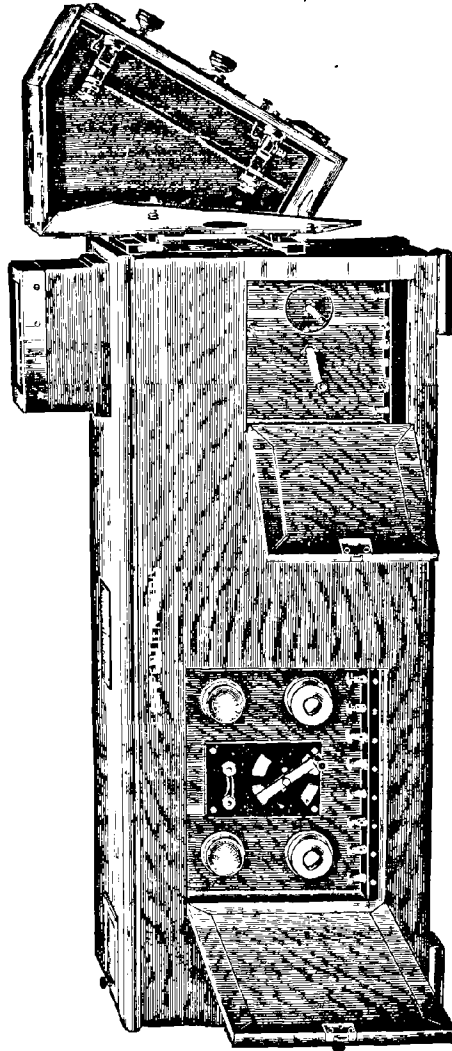


Fig. 89 bis.

Chaque appareil contient en général deux galvanomètres, un pour les volts, l'autre pour les ampères.

En dehors des galvanomètres, un oscillographe contient :

Le *synchronoscope* (à droite de la figure 89) formé d'un miroir, qui a

un mouvement oscillant autour d'un axe perpendiculaire aux axes des équipes. Pour arriver à ce résultat, un ressort fait appuyer le miroir sur une came, taillée convenablement et montée sur l'arbre du rotor d'un moteur synchrone, alimenté par la source dont on étudie le courant. Ce moteur a 6 pôles, il fait donc un tour par trois périodes.

Une lampe à arc, alimenté par du courant continu et réglable à la main, éclaire les miroirs des galvanomètres, à travers une fente et une lentille cylindrique qui concentre la lumière. Les rayons réfléchis par les petits miroirs arrivent au miroir du synchronoscope, à travers une autre lentille cylindrique ; ils sont réfléchis de nouveau sur un écran ou sur une plaque photographique.

Le miroir de chaque galvanomètre donne au rayon correspondant un mouvement oscillant proportionnel au courant ; le miroir du synchronos-

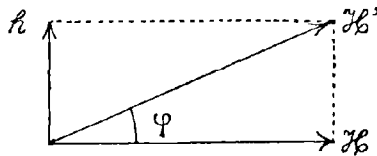


Fig 90.

cope lui donne ensuite un mouvement perpendiculaire au précédent, et uniforme pendant deux périodes sur trois. L'ensemble des deux mouvements ont pour résultat de faire décrire au point lumineux, la courbe $i = f(t)$ sur l'écran. Pendant la troisième période du tour du moteur synchrone le trait lumineux revient à son point de départ. On peut armer un *obturateur* qui supprime le trait de retour. On peut aussi s'arranger pour que l'obturateur ne soit ouvert que pendant deux périodes utiles : on a alors une courbe instantanée. Une série d'interrupteurs et de fusibles complètent l'appareil (fig. 89^{bis}).

Rhéographe Abraham-Carpentier. — Dans cet appareil l'équipage du galvanomètre a une période plus grande que celle du courant I à inscrire ($T_0 =$ quelques dixièmes de seconde) et le courant qui le traverse n'est pas I , mais un courant, fonction appropriée de I .

Nous décrirons le nouveau modèle à projection et nous expliquerons

rapidement son fonctionnement. Il se compose de deux parties : un *galvanomètre double* et un *synchronoscope*.

L'équipage mobile de chaque galvanomètre se compose d'un anneau *c* en aluminium (fig. 91 et 92) fermé sur lui-même et suspendu par un

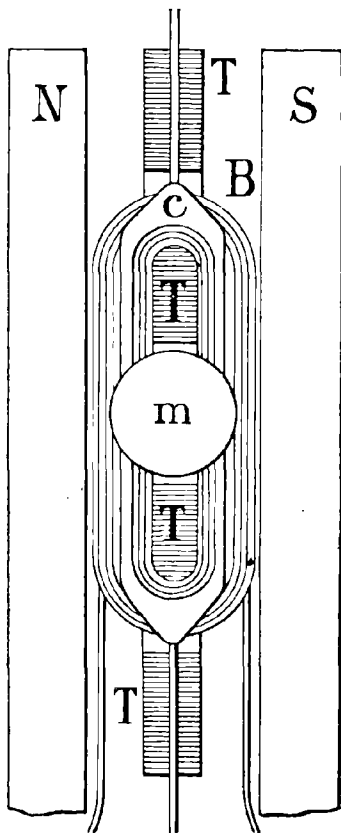


Fig. 91.

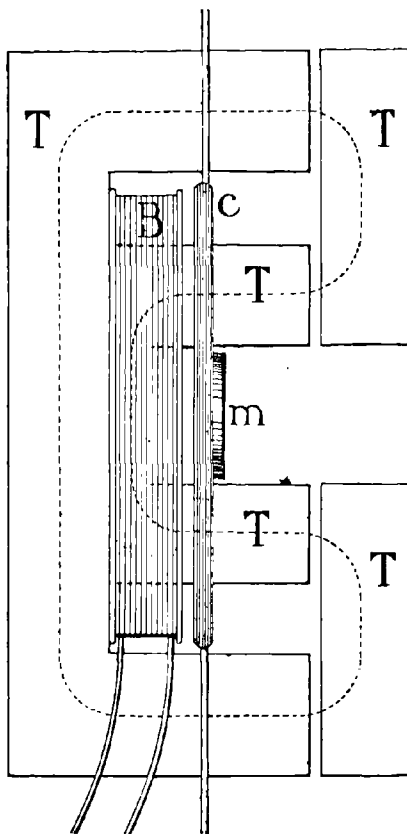


Fig. 92.

fil de cocon — à couple de torsion négligeable. Cet anneau — qui porte un miroir de 6 à 8 millimètres carrés — est placé entre les pôles d'un aimant permanent NS et sur un noyau magnétique d'un petit transformateur TTTT', dont le circuit magnétique n'est pas complètement fermé.

L'équipage mobile joue le rôle de secondaire de ce petit transformateur, dont le primaire est formé par la bobine B.

Le principe du fonctionnement est le suivant :

Soit i la valeur instantanée du courant qui passe dans la bobine B. Le courant i' induit dans le cadre mobile, sera donné par les équations du transformateur (1) : $0 = ri' + \frac{d\Phi}{dt}$ et $ni + i' = \frac{R}{4\pi} \Phi$, r étant la résistance du cadre mobile dont on peut négliger le coef. de self., n le nombre de spires de la bobine B et Φ le flux commun au primaire et au secondaire.

De ces équations on tire, en négligeant i' devant $n \cdot i$, et en posant

$$\begin{aligned} A &= - \frac{4\pi n}{Rr} \\ (56) \quad i' &= A \frac{di}{dt}. \end{aligned}$$

D'autre part, l'équipage mobile ayant les couples de torsion et d'amortissement négligeables devant le couple d'inertie, on a :

$$K \frac{d^2\alpha}{dt^2} = Gi' = GA \frac{di}{dt}$$

(voir fasc. 20, page 31), d'où, en intégrant deux fois :

$$(56') \quad \alpha = \frac{GA}{K} \cdot \int i dt.$$

Il résulte, de ce que nous avons vu, que le cadre mobile n'a pas de zéro déterminé (n'ayant pas de couple de torsion) et que, lorsqu'un courant parcourt la bobine B, la déviation, à partir de la position initiale arbitraire, est proportionnelle à la quantité totale d'électricité qui a passé dans B.

Pour pouvoir inscrire la courbe de variation d'une quantité électrique quelconque, il suffit de s'arranger pour que i soit proportionnel à la dérivée de cette quantité.

Ainsi, par exemple, pour inscrire la courbe d'une diff. de pot. u , on monte la bobine B en série avec un condensateur et l'ensemble entre les bornes entre lesquelles la diff. de pot. est u ; on a alors $i = C \frac{du}{dt}$, C étant la capacité du condensateur (la résistance du circuit étant négligeable).

(1) Voir JANET, *Op. cit.*, Tome II. Transformateurs.

Si on veut inscrire un courant I , on le fait passer dans le primaire d'un transformateur à circuit magnétique ouvert, dont le secondaire est fermé sur B. Des considérations analogues à celles développées plus haut, nous donnent $i' = A' \frac{dI}{dt}$.

Si on veut inscrire le flux embrassé par une bobine, on relie les extrémités de celle-ci aux bornes de B. Le courant induit par la variation de ce flux est proportionnel à $\frac{d\Phi}{dt}$.

Les sensibilités de l'appareil sont les suivantes :

On a une projection d'un mètre de large sur un écran situé à 3 mètres des galvanomètres : 1° pour un courant de 10 ampères efficaces, dans le transformateur à circuit magnétique ouvert ; 2° pour 100 volts efficaces avec un condensateur de 1 microfond ; 3° pour un flux total de 10^6 gauss dans la bobine exploratrice.

Le *synchronoscope* sert à donner aux rayons, réfléchis par les miroirs des galvanomètres, un mouvement perpendiculaire à celui que lui imprime ces miroirs et tel qu'on ait, sur la projection, des ordonnées proportionnelles ou temps. Il se compose d'un prisme équilatéral fonctionnant par réflexion totale et mis en mouvement par un moteur synchrone, à grand nombre de pôles — de façon à faire environ un tour par seconde. Le prisme donne donc 3 images de la courbe par seconde ; mais les rayons sortis du prisme sont réfléchis par quatre miroirs fixes qui les renvoient à la même place de l'écran. On a ainsi environ douze apparitions de la courbe par seconde — on a donc une persistance suffisante de l'image.

Analyse d'une courbe de courant alternatif. — Il est souvent utile de connaître les harmoniques d'une courbe de courant alternatif. On peut, pour cela, une fois la courbe tracée, chercher à retrouver les harmoniques par des méthodes graphiques ou par le calcul. Plusieurs méthodes ont été indiquées par S. P. Thomson ⁽¹⁾, Fischer Hinnen, etc. On a même construit des appareils (exemple l'intégrateur Corradi) per-

(1) Voir JANET, *Op. cit.*, Tome II.

mettant de faire rapidement cette analyse. Mais il est plus intéressant de retrouver les harmoniques sans tracer la courbe. On peut employer pour cela la méthode de M. Pupin, ou celle de M. Armagnat, qui dérive de la précédente.

Le principe de ces méthodes est le suivant : Soit

$$u = U_1 \sin \omega t + U_3 \sin (3\omega t + \psi_3) + \dots + U_n \sin (n\omega t + \psi_n) + \dots \quad (1)$$

une diff. de pot. dont on cherche les harmoniques. On la fait agir sur un circuit contenant une bobine de self à coef. de self réglable (voir par exemple, fasc. 21, page 136) et une capacité à plusieurs subdivisions. Si R est la résistance de la bobine de coef. de self. L, et C la capacité, on aura un courant i , donné par :

$$i = I_1 \sin (\omega t - \varphi_1) + I_3 \sin (3\omega t + \psi_3 - \varphi_3) + \dots$$

avec

$$I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}}, \quad I_3 = \frac{U_3}{\sqrt{R^2 + \left(3L\omega - \frac{1}{3C\omega}\right)^2}}, \dots$$

$$I_n = \frac{U_n}{\sqrt{R^2 + \left(nL\omega - \frac{1}{nC\omega}\right)^2}}, \dots$$

et

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}, \quad \operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{3L\omega - \frac{1}{3C\omega}}{R}, \dots, \quad \operatorname{tg} \varphi_n = \frac{nL\omega - \frac{1}{nC\omega}}{R}.$$

Si on s'arrange pour faire *résonner* l'harmonique n , c'est-à-dire pour avoir $nL\omega - \frac{1}{nC\omega} = 0$, la valeur de I_n , qui devient $I_n = \frac{U_n}{R}$, sera très grande par rapport aux autres, si R est assez petit, et φ_n devient égal à zéro. Si on inscrit alors la courbe de i , à l'aide d'un oscillographe, par exemple, (méthode de M. Armagnat) cette courbe ne contiendra, en général, que le terme en I_n , qui est en phase avec le terme correspondant de u et dont l'amplitude est proportionnelle à U_n .

(1) Les courants industriels n'ont, en général, que les harmoniques impaires.

Quelquefois l'harmonique principale se trouve dans la courbe, parce

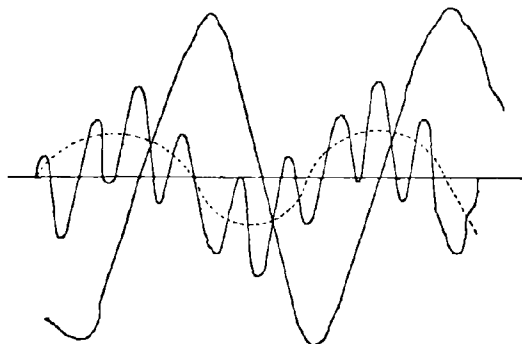


Fig. 93.

qu'elle est très importante par rapport aux autres (fig. 93); dans d'autres

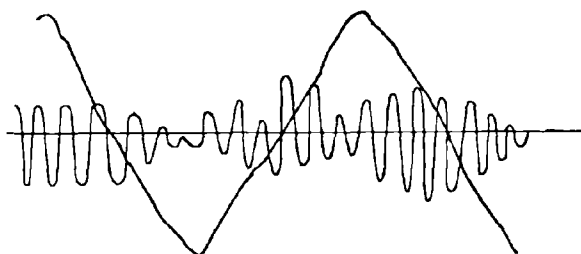


Fig. 94.

cas les harmoniques voisines se trouvent avec celles qu'on fait résonner

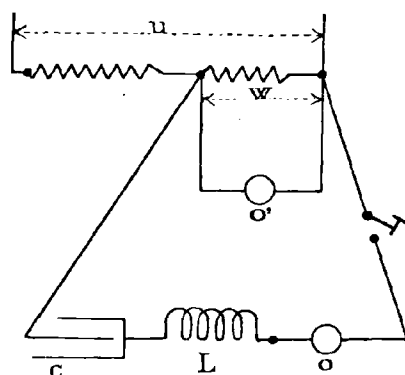


Fig. 95.

et on a des phénomènes de battements (fig. 94). La figure 95 donne le

schéma du montage. On y a réduit les volts pour ne pas avoir des courants trop forts, ce qui donnerait des diff. de pot. dangereuses (1) aux bornes des capacités et de la bobine de self.

L'oscillographe O' sert à tracer en même temps la courbe totale.

(1) Chaque fois qu'on emploie la résonance, on doit se préoccuper des diff. de pot. aux bornes des capacités et de la bobine de self, qui peuvent être élevées, même si la diff. de pot. totale est faible.

CHAPITRE VII

Transformateurs pour appareils de Mesures

Il est difficile de construire des appareils (ampèremètres, wattmètres, compteurs) pour la mesure de courants très forts. On obtiendrait, en tout cas, des appareils encombrants et ayant une forte consommation ; les contacts entre ces appareils et le reste du circuit seraient difficiles à exécuter et consommeraient une grande puissance. Dans le cas des courants alternatifs, on préfère employer des *transformateurs d'intensité*, dont le primaire est parcouru par le fort courant et dont le secondaire est fermé sur l'appareil de mesure, habituellement de calibre de 5 ou de 10 ampères. On emploie les transformateurs d'intensité, même pour les courants moyens, dans le cas des circuits à haute tension ; dans ce cas le transformateur permet d'isoler les appareils de mesure du circuit.

Dans le cas de la haute tension on emploie aussi des *transformateurs de tension*, dont le primaire est monté sur la diff. de pot. à mesurer et le secondaire, dont la tension est de beaucoup plus faible, sur l'appareil de mesure (voltmètre, fil fin de wattmètre ou de compteur).

La plupart des constructeurs d'appareils de mesures construisent aussi des transformateurs de tension et d'intensité.

Transformateurs de tension. — Ces appareils ne sont que des transformateurs de puissance, dont le secondaire fournit une puissance faible ; le rapport de transformation $\frac{U_2}{U_1}$ doit être voisin du rapport du

nombre des spires $\frac{n_2}{n_1}$, c'est-à-dire qu'on doit avoir une faible chute de tension. Cette condition sera plus rigoureuse, lorsque le transformateur devra servir avec le fil fin d'un wattmètre ou d'un compteur électrodynamiques. Dans ce cas, le décalage entre le courant dans le secondaire et la tension primaire intervient pour fausser les résultats (voir page 22); ce décalage sera d'autant plus faible que $\frac{U_2}{U_1}$ se rapprochera davantage de $\frac{n_2}{n_1}$. Les wattmètres ou les compteurs d'induction peuvent être réglés, une fois montés sur leur transformateur.

Voici, à titre d'exemple, des données numériques sur quelques transformateurs de précision Siemens et Halske. La tension secondaire est de 100 volts; le primaire peut avoir une ou plusieurs sensibilités. L'angle de décalage entre les tensions secondaires et primaires est d'environ 10 minutes, dans les conditions courantes de fonctionnement. Le circuit magnétique de ces transformateurs n'a pas de joints.

Type	Puissance dans le secondaire donnant une chute de tension de 1 0/0 pour $\cos \varphi = 1$		Puissance apparente maxima que peut supporter le transf. en volt-ampères		Chute de tension pour la puissance maxima		Consommation à vide en watts	
	Fréquence		Fréquence		Fréquence		Fréquence	
	50	25	50	25	50	25	50	25
	env.	env.	env.	env.	env.	env.	env.	env.
Mtr 21 p	23	6	200	120	4,5	10	8,5	5
Mtr 22 ap.	100	20	500	230	2,5	4	20	10,75
Mtr 40	100	100	400	400	4	4	12	18,6
Mtr 40 a	50	50	200	200	4	4	6,2	9,5

La consommation des voltmètres et des fils fins des wattmètres et des compteurs, qui servent avec ces transformateurs, étant comprise, en général, entre 2 et 5 volts-ampères, on peut mettre plusieurs de ces appareils en parallèle sur le secondaire.!

Transformateurs d'intensité. — Dans ces transformateurs c'est le

rapport entre les courants, primaire et secondaire, qui doit être pratiquement constant pour une fréquence donnée et peu influencé par la variation de celle-ci. Si l'appareil doit servir avec un wattmètre ou un compteur électrodynamiques, le décalage entre les courants doit être aussi voisin que possible de 180° . Ces conditions sont difficiles à remplir, surtout qu'elles doivent l'être dans les larges limites dans lesquelles varie le courant.

Pour nous rendre compte du fonctionnement des transformateurs d'intensité, nous allons faire rapidement leur théorie (¹).

Soient i_1 , i_2 et I_1 , I_2 les valeurs instantanées et efficaces des courants primaire et secondaire (fig. 96), r_2 la résistance *totale* du secondaire, R

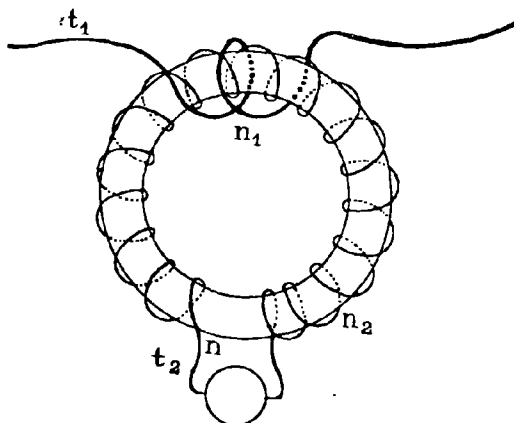


Fig. 96.

N.B. — A la place de t_1 , lire i_1 ; à la place de t_2 , lire i_2 .

la reluctance moyenne du circuit magnétique parcouru par le flux Φ , commun aux deux enroulements; Φ_{eff} la valeur efficace de Φ , L_2 le coef. de self-induction du circuit secondaire, comprenant le coef. de self. supplémentaire, provenant des fuites magnétiques, et le coef. de self. des appareils de mesures.

(¹) Voir JANET et LIOVICI : *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, Février 1903.

et

$$CB = \frac{R r_2}{4 \pi n_2 \omega} \cdot I_2.$$

Ceci dit, le triangle ABC donne :

$$n_1 I_1 = \sqrt{(n_2 I_2 + OC)^2 + CB^2},$$

et, en remplaçant OC et OB par leurs valeurs, on a :

$$(59) \quad n_1 I_1 = n_2 I_2 \sqrt{\left(1 + \frac{R l_2}{4 \pi n_2^2}\right)^2 + \frac{R^2 r_2^2}{16 \pi^2 n_2^2 \omega^2}};$$

et d'autre part :

$$(60) \quad \text{tang } \Psi = \frac{BC}{AO + OC} = \frac{R r_2}{(4 \pi n_2^2 + R l_2) \omega},$$

Ψ étant le supplément de l'angle de décalage des deux courants.

Les relations (59) et (60) sont les formules fondamentales d'un transformateur d'intensité (1). Pour un transformateur idéal on devrait avoir $\frac{n_1 I_1}{n_2 I_2} = 1$ et $\Psi = 0$; un tel transformateur serait indépendant de la fréquence. Pour se rapprocher le plus possible d'un appareil idéal, il faut, d'après les formules (59) et (60) :

1° Une faible reluctance du circuit magnétique; les appareils sans joints seront donc préférables; 2° Une faible résistance au circuit secondaire; 3° Un grand nombre de spires n_2 ; cette condition est essentielle et peut racheter les autres; 4° Un faible coef. de self. l_2 .

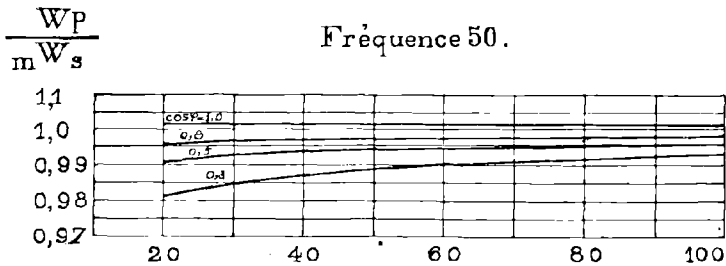
Lorsque le transformateur est employé avec un wattmètre ou compteur électrodynamiques, la condition (60) est essentielle; on a vu en effet, page 22, que les indications de ces appareils dépendent du décalage entre les courants dans les circuits, fixe et mobile. Ce décalage est influencé par Ψ , son influence étant d'autant plus grande que le circuit d'utilisation est plus inductif.

Remarquons que le coef. de self. l_2 a une influence favorable sur Ψ .

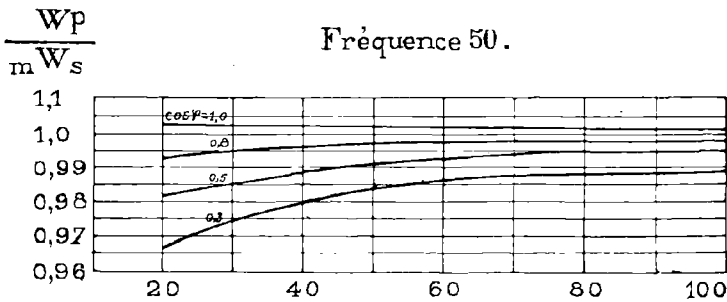
(1) Dans ces formules nous n'avons pas tenu compte des phénomènes d'hystérésis et des courants de Foucault dans le fer, qui ont une faible influence.

Ceci intervient dans les appareils d'induction ; dans ce cas d'ailleurs, on peut régler l'appareil avec son transformateur, parce qu'on dispose de moyens de réglage (voir page 90).

Dans le cas de très forts courants, les transformateurs qui conviennent le mieux sont les transformateurs annulaires ⁽¹⁾, formés d'un circuit



(a) Le secondaire contient un wattmètre de précision de 5 ampères. — En abscisse, 100 divisions valent 5 ampères.



(b) Le secondaire contient un wattmètre de précision et un ampèremètre (5a). — En abscisse, 100 divisions valent 5 ampères.

Fig. 97.

magnétique sans joints et d'un secondaire enroulé bien régulièrement ; le primaire est constitué par le circuit d'utilisation, qui forme une grande spire. La position de ces appareils par rapport au circuit n'intervient pas.

Voici, à titre d'exemple, quelques renseignements, sur des transfor-

(1) Voir JANET et ILIOVICI : *Op cité*. La forme indiquée a été adoptée par plusieurs constructeurs : Carpentier, Chauvin et Arnoux, Compagnie Anonyme Continentale des Compteurs, etc.

mateurs de précision Siemens et Halske. Le circuit magnétique est rectangulaire et sans joints. Le secondaire est fait pour un courant de 5 ampères ; le primaire peut avoir une ou plusieurs échelles de mesures, qu'on obtient en groupant, en série ou en parallèle, un certain nombre de groupes de spires. Le rapport de transformation est exact à moins

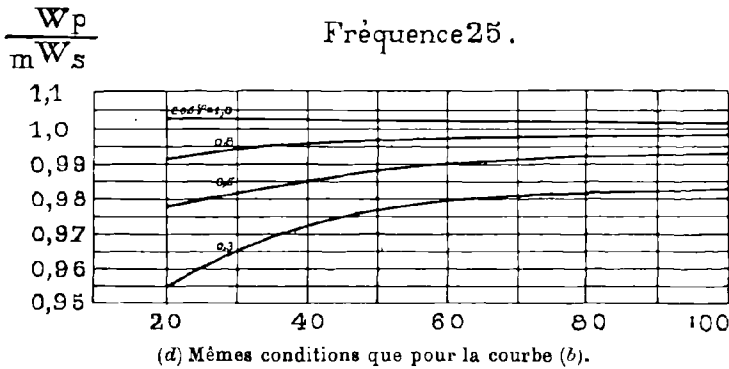
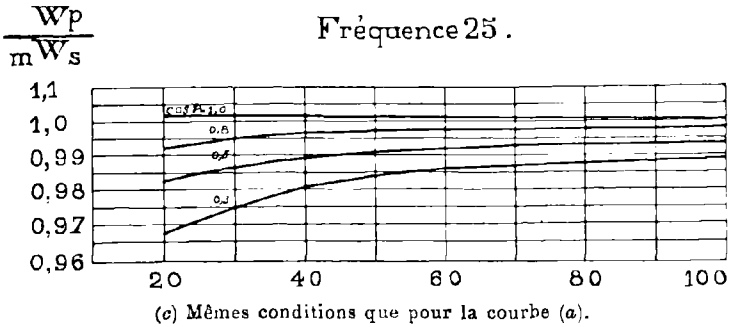


Fig. 98 bis.

de 0,5 % près, depuis le 1/10 du courant normal, à condition que l'ensemble des appareils du secondaire ne demande pas une tension supérieure à 4 volts. L'angle Ψ est inférieur à 15 minutes pour la charge normale et inférieur à 36 minutes pour le 1/5 de la charge. La consommation du transformateur est de 25 watts pour la charge maxima. Les figures 98 donnent des courbes de : $\frac{W_p}{m W_s}$ (1), pour des transformateurs de ce type.

(1) W_p , puissance primaire, w_s puissance secondaire, m le rapport de transformation. Pour un transformateur idéal on aurait $\frac{W_p}{m W_s} = 1$.

La figure 99 donne des résultats relatifs à un transformateur industriel de la C^o des Compteurs.

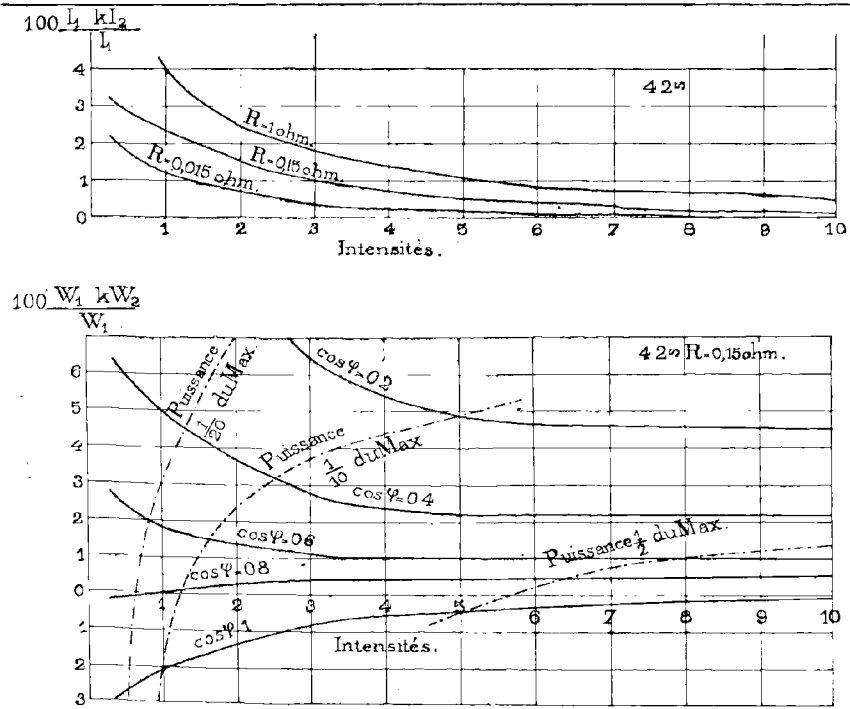


Fig. 99.

N.B. A la place de $100 \frac{I_2 k I_2}{I_1}$, lire : $100 \frac{I_1 - k I_2}{I_1}$; à la place de $100 \frac{W_2 kW_2}{W_1}$, lire : $100 \frac{W_1 - kW_2}{W_1}$.

I_1 courant primaire, I_2 courant secondaire; W_1 et W_2 puissances primaire et secondaire. On a porté en abscisses le courant secondaire.

Remarques importantes. — 1° Le secondaire d'un transformateur d'intensité doit toujours être fermé sur les appareils de mesures, ou en court-circuit; avec le secondaire ouvert on risque d'avoir une tension élevée, qui peut être dangereuse, et une forte induction dans le fer, ce qui pourrait produire un échauffement exagéré.

2° Dans les circuits à haute tension, il est bon de réunir un point du primaire avec un point du secondaire et avec la terre.

3° Ne pas demander aux transformateurs une puissance plus forte que celle indiquée par le constructeur ; on risque d'avoir des résultats inexacts, le rapport de transformation dépendant de cette puissance.



CHAPITRE VIII

Mesures magnétiques

Définitions et formules. — Champ magnétique. — Le *champ magnétique* (\mathcal{H}), en un point d'un corps non magnétique, est défini par la force qui s'exercerait sur une unité de masse magnétique positive, si on la plaçait en ce point. Ce champ est la résultante des actions magnétiques des courants et des aimants qui se trouvent dans l'espace.

Induction. — Dans l'espace occupé par un corps magnétique on définit, en chaque point, le *champ magnétique* et l'*induction*. Pour cela on considère l'unité de masse magnétique positive placée dans une cavité non magnétique creusée dans le corps. Cette cavité, infiniment petite, est supposée avoir la forme d'un cylindre très aplati, dont les bases se trouvent à une distance infiniment petite par rapport à leurs dimensions linéaires. L'action magnétique, qui s'exercerait sur l'unité de masse, dépend de l'orientation de la cavité : lorsque l'orientation est telle qu'il n'y a pas de magnétisme libre sur les bases, cette action est le *champ magnétique* (\mathcal{H}) au point considéré. Si, au contraire, le magnétisme libre sur les bases a sa densité maxima, la force qui s'exercerait sur la masse magnétique s'appelle *induction magnétique* (\mathcal{B}).

Ces deux forces (vecteurs) ont la même direction et le même sens dans les corps isotropes ; pour la simplicité, on suppose cette condition remplie dans les cas de la pratique.

Flux d'induction. — Le *flux d'induction* à travers une surface S est défini par :

$$(61) \quad \Phi = \int_S \mathfrak{B} \cdot dS \cdot \cos \alpha,$$

\mathfrak{B} étant l'induction en un point de l'élément de surface dS , α l'angle que fait le vecteur \mathfrak{B} avec la normale à dS . Dans les corps non magnétiques on a $\mathfrak{B} = \mathcal{H}$, et la formule (61) définit le flux de champ magnétique.

Le flux à travers une spire est, par définition, le flux à travers une surface quelconque limitée par la spire.

Le flux à travers une bobine est la somme des flux à travers ses spirés.

L'intérêt de la notion d'induction vient de ce fait, que dans les phénomènes d'induction (donc dans le fonctionnement des machines électriques) intervient le flux Φ défini par la formule (61).

Perméabilité. — La *perméabilité* (μ) d'un corps en un point est définie par le rapport : $\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathcal{H}}$. Pour les corps non magnétiques on a évidemment $\mu = 1$.

Les corps *diamagnétiques* sont ceux pour lesquels $\mu < 1$; μ diffère d'ailleurs très peu de l'unité ; par exemple pour le bismuth $\mu = 0,99984$. Les corps, pour lesquels μ est supérieur à 1 et constant, sont dits *paramagnétiques* ; la valeur de μ diffère peu de l'unité ; par exemple, pour le palladium on a $\mu = 1,000061$. Enfin les corps *ferromagnétiques* ont une perméabilité variable avec \mathcal{H} . Ce sont les plus importants pour la pratique. Exemples : fer, acier, nickel, etc.

Hystérésis. — Dans la plupart des corps ferromagnétiques, l'induction \mathfrak{B} et la perméabilité μ ne sont pas de fonctions uniformes de \mathcal{H} : pour une valeur du champ en un point, l'induction \mathfrak{B} , qui lui correspond, peut avoir une infinité de valeurs, suivant les opérations auxquelles avait été soumis le corps antérieurement et suivant les valeurs par lesquelles a passé \mathcal{H} pour arriver à sa valeur actuelle. Cette propriété s'appelle *hystérésis*.

Cycle d'hystérésis. — Supposons, en particulier, qu'on prenne un

corps, qui n'a jamais été aimanté, et qu'on s'arrange pour produire, en tous ses points un champ uniforme \mathcal{H} , dont la valeur part de zéro pour arriver à un maximum \mathcal{H}_m , diminue ensuite jusqu'au zéro, change de signe pour arriver à une valeur négative $-\mathcal{H}_m$, et revient ensuite vers \mathcal{H}_m en reprenant le chemin inverse du précédent. On peut tracer une courbe, en prenant en abscisse le champ \mathcal{H} et en ordonnée l'induction \mathcal{B} . Cette courbe, qui a l'allure (fig. 108), s'appelle *cycle d'hystérésis* ou encore *cycle d'aimantation*.

Définition pratique de la perméabilité. — Si, après avoir désaimanté un corps magnétique, nous le soumettons à un champ \mathcal{H} , qu'on fait varier plusieurs fois de $+\mathcal{H}_m$ à $-\mathcal{H}_m$ et inversement, l'induction \mathcal{B} , qui correspond à $+\mathcal{H}_m$, tend à prendre une valeur \mathcal{B}_m pratiquement bien définie; le rapport $\frac{\mathcal{B}_m}{\mathcal{H}_m}$ est pris, dans la pratique, comme valeur de la perméabilité pour le champ \mathcal{H}_m .

Ligne de force. — Nous appellerons *ligne de force magnétique*, toute courbe qui, en tous ses points, est tangente à l'induction, dans les corps magnétiques, et au champ, dans les corps non magnétiques.

Tube de force. — On appelle *tube de force* un tube, ouvert ou fermé, dont les parois latérales sont formées par des lignes de force. Le flux d'induction est le même à travers toutes les sections d'un même tube de force.

Force magnétomotrice d'une bobine (\mathcal{F}). — C'est l'expression $4\pi nI$, n étant le nombre de spires de la bobine et I le courant dans ces spires.

Reluctance (\mathcal{R}). — La *reluctance* d'un tube de force de section uniforme, faisant partie d'un corps homogène, est définie par $\mathcal{R} = \frac{l}{\mu s}$, l étant la longueur, s la section du tube et μ la perméabilité de la substance. Pour un tube non homogène, ou de section non uniforme, on a : $\mathcal{R} = \mathcal{R}' + \mathcal{R}'' + \dots$, si on peut le décomposer, suivant sa longueur, en une série de tubes homogènes, de sections uniformes et de reluctances \mathcal{R}' , \mathcal{R}''

Si un tube de force fermé traverse une ou plusieurs bobines parcourues par du courant, on a, entre le flux (Φ), la f. m. m. totale de ces bobines (\mathcal{F}) et la reluctance (\mathcal{R}) du tube de force, la relation :

$$(62) \quad \mathcal{R}\Phi = \mathcal{F}$$

(Loi d'Ohm appliquée au circuit magnétique).

Si un *circuit magnétique* fermé est formé d'une succession de tubes de forces en série, caractérisés par les flux $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3 \dots$ et les reluctances $\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \mathcal{R}_3 \dots$, et si ce circuit traverse une ou plusieurs bobines, dont la f. m. m. totale est \mathcal{F} , on a :

$$\mathcal{R}_1\Phi_1 + \mathcal{R}_2\Phi_2 + \dots = \mathcal{F}$$

(Loi de Kirchoff appliquée au circuit magnétique).

Diff. de pot. magnétique. — Nous appellerons *diff. de pot. magnétique* (\mathcal{V}) entre deux points A et B, la plus petite valeur qu'on peut obtenir pour le travail du champ \mathcal{H} , lorsqu'on fait passer l'unité de masse magnétique de A en B. On appelle *surface équipotentielle* une surface dont tous les points sont au même potentiel magnétique. Les surfaces équipotentielles sont normales, en chaque point, aux lignes de force.

Si entre les surfaces équipotentielles, sur lesquelles se trouvent les points A et B, on peut tracer un tube de force homogène et de section constante, on a :

$$(63) \quad \mathcal{V} = \mathcal{H}l = \mathcal{R}\Phi,$$

si la ligne de force ne traverse aucune bobine, et

$$(64) \quad \mathcal{V} = \mathcal{H}l \pm \mathcal{F} \quad \text{ou} \quad \mathcal{V} = \mathcal{R}\Phi \pm \mathcal{F}$$

si elle traverse des bobines de f. m. m. totale \mathcal{F} .

[l étant la longueur du tube de force, \mathcal{R} sa reluctance et Φ le flux qui traverse une section].

Unités. — On emploie les unités électromagnétiques théoriques. A certaines de ces unités on a donné des noms. Ainsi l'unité de champ ou d'induction s'appelle : *Gauss* ; l'unité de flux : *Maxwell*.

Formules. — 1° Le champ \mathcal{H} à l'intérieur d'un tube de force fermé, de section constante et qui traverse une bobine de f. m. m. \mathcal{F} , est donné par la formule : $\mathcal{H} = \frac{\mathcal{F}}{l}$; ou encore :

$$(65) \quad \mathcal{H} = \frac{0,4 \pi n I}{l} = \frac{1,256 n I}{l}$$

si I est donné en ampères. (l est la longueur du tube de force). Si le tube de force a la forme d'un tore, de rayon moyen r , on a encore :

$$(65') \quad \mathcal{H} = \frac{0,2 n I}{r}.$$

La formule reste la même, pour un tube de force ouvert, dont les faces extrêmes sont des surfaces équipotentiellles au même potentiel.

2° L'attraction, qui s'exerce entre les faces en contact de deux corps magnétiques, est donnée par la formule :

$$(66) \quad F = \frac{S \mathcal{B}^2}{8\pi} \text{ dynes} = \frac{4,06}{10^8} \cdot S \mathcal{B}^2 \text{ kilogrammes,}$$

S étant la surface commune aux deux faces en contact, \mathcal{B} l'induction dans leur voisinage, supposée uniforme.

3° Si le flux Φ dans un circuit fermé, de résistance totale R , varie de $\Delta\Phi$, il s'induit dans ce circuit une quantité d'électricité q donnée par :

$$(67) \quad q = \frac{\Delta\Phi}{R}.$$

MÉTHODES DE MESURES

Mesure de la variation d'un flux. — Dans un grand nombre de méthodes ou d'appareils de mesure magnétiques, on a à mesurer la variation d'un flux. On peut employer dans ce but soit un *fluxmètre* (voir page 136) soit une des méthodes suivantes comportant l'emploi d'un balistique.

1° On fait le montage (fig. 100). En faisant varier le flux à travers B de $\Delta\Phi$ (1) il passe dans le balistique une quantité d'électricité :

$$(67') \quad q = \frac{\Delta\Phi}{R}, \text{ (en posant } R = r + \rho + g \text{)}$$

et on a une élévation θ , donné par la relation :

$$(68) \quad q = \frac{\Delta\Phi}{R} = K\theta$$

$\frac{1}{K}$ étant la constante du balistique dans les conditions d'expérience.

On charge ensuite le condensateur C à l'aide de la source E, en plaçant

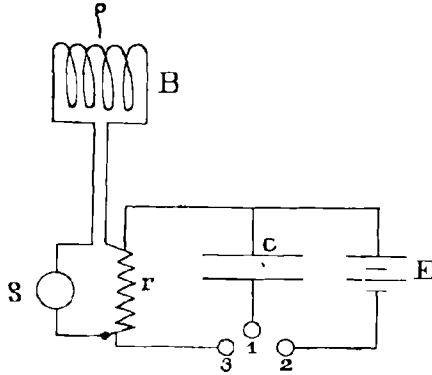


Fig. 100.

un cavalier dans les godets (1,2), et on le décharge ensuite dans le balistique, en transportant le même cavalier en (1,3). La charge du condensateur a été CE ; la quantité d'électricité dans le balistique sera $\frac{CEr}{R}$, et on aura l'élévation θ_1 , donnée par :

$$(68') \quad \frac{CEr}{R} = K\theta_1 \text{ (}^2\text{)}.$$

Des formules (68) et (68') on déduit :

$$(69) \quad \Delta\Phi = \left(\frac{CEr}{\theta_1} \right) \cdot \theta.$$

(1) Cette variation doit être très rapide (voir. fasc. 20, page 75)

(2) On a la même constante K parce qu'on n'a pas touché au circuit du balistique; les conditions d'amortissement sont donc restées les mêmes (voir fasc. 20, p. 81).

Dans cette formule les quantités C, E, r doivent être exprimées en U.E.M.T., comme $\Delta\Phi$. Si on exprime C en microfarads, E en volts et r en ohms, on aura :

$$(69') \quad \Delta\Phi = \left(\frac{C \cdot E \cdot r \cdot 10^8}{\theta_1} \right) \cdot \theta.$$

2° On fait le montage (fig. 101). On fait varier le flux à travers la bobine B , de $\Delta\Phi$ et on a, dans le balistique, une quantité d'électricité donnée

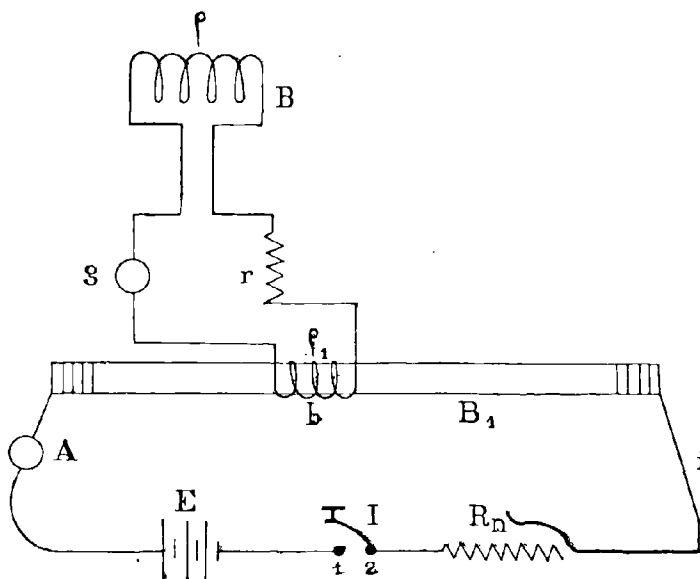


Fig. 101.

par la formule (67) (avec $R = r + \rho + \rho_r + g$). Celui-ci donne donc une élongation θ , qui satisfait à la formule (68).

Si on établit alors rapidement le courant i dans la bobine B_1 , en fermant l'interrupteur I , le flux dans la bobine b varie de 0 à $\Phi_1 = \mathcal{H}N$, \mathcal{H} étant le champ créé par la bobine B_1 , à l'endroit occupé par b . Si la bobine B_1 est suffisamment longue, on a $\mathcal{H} = 0,4\pi \frac{n}{l} i$ (i étant exprimé en ampères), et la variation $\Delta\Phi$ du flux est donnée par la formule :

$$\Delta\Phi_1 = 0,4\pi \frac{nN_s}{l} i.$$

Le balistique est parcouru par une quantité d'électricité $q_1 = \frac{\Delta\Phi_1}{R}$ et donne une élancement θ_1 , qui satisfait à la formule $\frac{\Delta\Phi_1}{R} = K\theta_1$, d'où :

$$(70) \quad 0,4 \frac{\pi n N s}{K l} i = K \theta_1.$$

Des formules (68) et (70) on déduit :

$$(71) \quad \Delta\Phi = \left(0,4 \frac{\pi n N s i}{l \theta_1} \right) \cdot \theta \quad (').$$

Mesure d'un champ. — Nous allons indiquer deux méthodes :

1°. Une bobine formée de plusieurs spires n' parallèles entre elles, de surfaces connues, et telles que le champ puisse être le même en tous ses points, est placée dans le champ \mathcal{H} à mesurer, perpendiculairement aux lignes de force. Si il est possible, on fait tourner la bobine de 180° autour du diamètre de la spire moyenne ; sinon on la retire brusquement du champ et on l'amène en un point de champ nul.

Dans le premier cas, le flux à travers la bobine varie de $\mathcal{H}CS$ à $-\mathcal{H}CS$, S étant la *surface totale* ; on a donc $\Delta\Phi = 2\mathcal{H}CS$. Dans le second cas le flux varie de $\mathcal{H}CS$ à 0 et on a $\Delta\Phi = \mathcal{H}CS$.

Suivant que la bobine aura été montée comme l'indique la figure 100 ou la figure 101, $\Delta\Phi$ sera donné par (69') ou (71), et on en déduira \mathcal{H} .

Le cas le plus important, dans la pratique, est celui où il s'agit de mesurer le champ dans un entrefer de dynamo. Dans ce cas la bobine devra avoir une faible épaisseur et une faible largeur, mais elle pourra être allongée ; parce que le champ dans l'entrefer a la même valeur tout le long d'une génératrice, mais varie suivant la circonférence de l'induit. On devra la placer de façon que sa longueur soit bien suivant une génératrice. En la retirant on l'amènera assez loin de la machine, pour être sûr qu'elle n'est pas traversée par les lignes de force de dispersion, et il serait même bon de lui faire faire un quart de tour, pour que la surface des spires soient parallèles à ces lignes de forces, si elles existaient.

(') On peut inverser le courant i ; on aurait, dans ce cas :

$$\Delta\Phi = \left(\frac{0,8\pi n N s i}{l \theta_1} \right) \cdot \theta.$$

Les expressions dans les parenthèses ont souvent la même valeur pour toute une série de mesures ; on pourrait, dans ce cas, les calculer d'avance.

Si on ne connaît pas la surface S de la bobine, on peut l'obtenir par comparaison avec une bobine de surface S' connue, en mesurant le même champ avec les deux bobines. Pour cela on fait le montage (fig. 102). On introduit successivement les deux bobines dans un même entrefer. Si θ et θ' sont respectivement les élongations obtenues au balistique, on a :

$$(72) \quad S = \frac{S'}{\theta'} \cdot \theta.$$

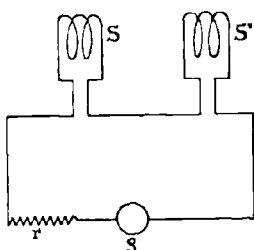


Fig. 102.

2° On peut mesurer le champ dans un entrefer en y introduisant une *sonde bismuthique*, dont on mesurera la résistance.

La résistance du bismuth augmente lorsqu'on le place dans un champ magnétique.

La sonde bismuthique Hartmann et Braun (fig. 103) se compose d'une spirale en bismuth chimiquement pur placée entre deux plaques en mica,

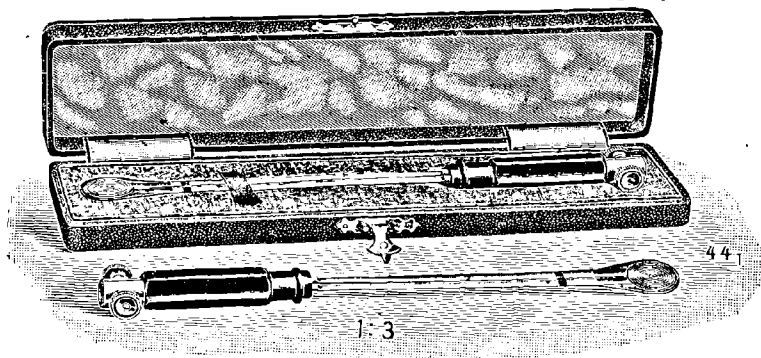
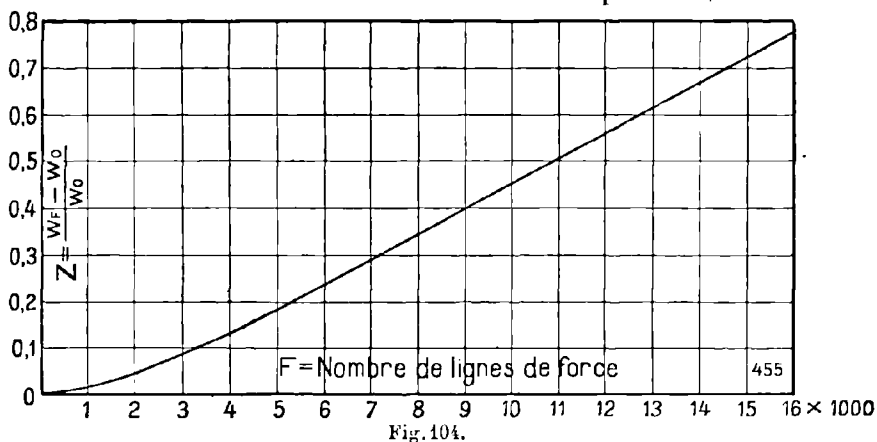


Fig. 103.

qui la protègent mécaniquement ; les extrémités de la spirale arrivent aux deux bornes, par l'intermédiaire de lames de cuivre de résistance né-

gligeable. Le diamètre de la sonde est d'environ 2 centimètres ; l'épaisseur est inférieure à 1 millimètre. La résistance peut être mesurée au pont d'Wheatstone. Elle est d'environ 20ω pour un champ nul et varie d'environ 5 % par 1 000 gauss. La courbe (fig. 104) indique la variation relative de la résistance en fonction du champ \mathcal{H} .

La résistance du bismuth varie aussi avec la température ; il faut donc



s'arranger de façon que la spirale ne chauffe pas : pour cela on la maintiendra très peu de temps dans l'entrefer, et on s'arrangera pour que le courant qui la traverse pendant la mesure soit très faible.

Mesure de la perméabilité d'une substance. — Les mesures de la perméabilité — et l'étude de l'hystérésis, dont on s'occupera plus loin — sont très importantes au point de vue industriel. Presque toutes les machines électriques (dynamos, transformateurs, bobines de réactance, électro-aimants, etc.) contiennent du fer, et les prévisions des calculs peuvent être complètement fausses, si les métaux employés n'ont pas les qualités qu'on leur avait supposées.

Mais les mesures magnétiques sont très délicates et doivent être faites avec beaucoup de soins si on veut pouvoir compter sur les résultats obtenus. On sait, (voir page 165), que l'état magnétique d'un fer ne dépend pas seulement du champ auquel il est soumis, mais des actions magnétiques et mécaniques antérieures ; il faut donc qu'on le ramène, avant de faire des mesures, à un état pratiquement bien défini. Il est bon,

par exemple, avant d'essayer un échantillon, de le soumettre d'abord à un champ supérieur au champ maximum, auquel il sera soumis pendant l'expérience. On inverse ensuite plusieurs fois ce champ. On lui donne ensuite une série de valeurs décroissantes jusqu'à zéro et, pour chacune de ces valeurs, on produit plusieurs inversions.

Il faut que l'échantillon se trouve dans le même état que les pièces qu'il représente : par exemple, pour les pièces forgées ou fondues, celles-ci n'étant pas recuites par le constructeur, les échantillons ne devront pas être recuits. De même les opérations mécaniques, auxquelles on doit soumettre l'échantillon pour lui donner la forme et les dimensions voulues, ne doivent pas changer la nature du métal ; on n'emploiera pour l'ajustage ni le marteau, ni le burin ; les outils à découper devront trancher nettement et ne pas refouler la matière.

Il faudra que le champ soit uniforme en tous les points de l'échantillon. Pour cela on peut lui donner, par exemple, la forme d'un cylindre très allongé (de longueur égale à 300 à 500 fois son diamètre, ou son plus grand côté si la section est rectangulaire) ou mieux la forme d'un tore à section rectangulaire, d'épaisseur radiale faible devant son diamètre moyen. (Les anneaux employés au Laboratoire Central d'Electricité pour la mesure de la perméabilité ou pour le tracé du cycle d'hystérésis statique (voir page 177) ont 14 centimètres de diamètre moyen et 1 centimètre d'épaisseur radiale). L'enroulement, qui entoure ces échantillons et qui sert à produire le champ, doit être fait avec beaucoup de régularité.

Les deux formes précédentes sont mal commode pour la pratique, la première à cause de la longueur exagérée de l'échantillon et de l'enroulement, la deuxième parce que — comme on va le voir — on doit faire pour chaque échantillon deux enroulements à la main. La deuxième forme est beaucoup employée dans les Laboratoires. Dans les appareils industriels on s'arrange pour avoir un champ pratiquement uniforme dans la partie utile de l'échantillon.

On ne doit pas oublier, que l'homogénéité du métal est très importante ; dans un métal non homogène les propriétés magnétiques peuvent varier d'une façon très sensible d'un point à l'autre.

Pour les faibles inductions et pour les échantillons épais on est

encore gêné, dans les mesures magnétiques, par le *trainage magnétique* ⁽¹⁾.

Méthode de mesure de Laboratoire. — L'échantillon ayant la forme d'un tore de dimensions appropriées ⁽²⁾ (voir plus haut), on enroule d'a-

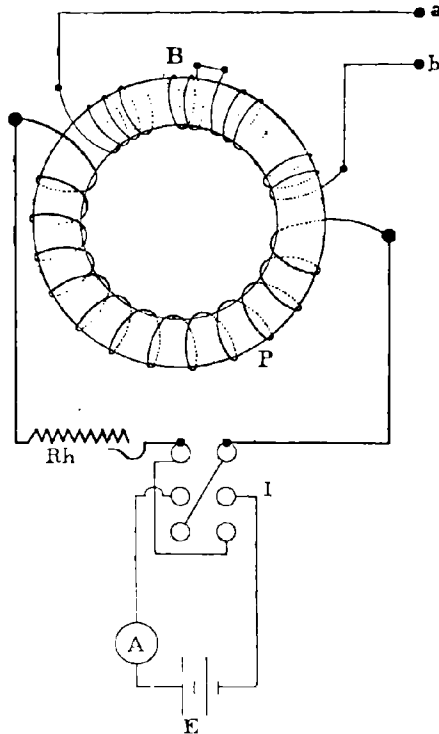


Fig. 105.

bord un certain nombre de bobines de fil fin, dont on emploiera une ou plusieurs en série (fig. 105), (chaque bobine a d'habitude 100 spires). On enroule ensuite, d'une façon très régulière et sur toute la longueur du

(1) Pour ce qui concerne les propriétés magnétiques des substances ferromagnétiques voir : JOUAUST : Le Ferromagnétisme.

(2) Si il s'agit de tôles, on superpose plusieurs rondelles, qu'on a le soin de bien vernir d'abord et qu'on sépare ensuite par des feuilles de papier de soie. Avant de faire les enroulements, il est bon de couvrir le tore d'une bande de toile, pour ne pas risquer d'abîmer le fil qu'on enroulera dessus.

tore, une ou plusieurs couches de fil, pouvant supporter le courant maximum utile pour obtenir le champ voulu. On fait ensuite le montage (fig. 105) pour le primaire et l'un de ceux des figures 100 ou 101 pour les bobines secondaires B.

L'échantillon étant pratiquement désaimanté (voir page 173) on fait passer dans le primaire le courant maximum. On l'inverse plusieurs fois, pour fixer l'état magnétique du métal, et on fait ensuite une inversion pendant laquelle on relève l'élongation du balistique. Cette dernière mesure peut être répétée plusieurs fois pour être sûr du résultat.

On donne ensuite à i une série de valeurs, de préférence décroissantes, et pour chacune d'elles on fait les opérations précédentes.

La formule (65) ou (65') donne, pour chaque valeur de i , le champ \mathcal{H} correspondant et la formule (69) ou (71), dans laquelle on remplace $\Delta\Phi$

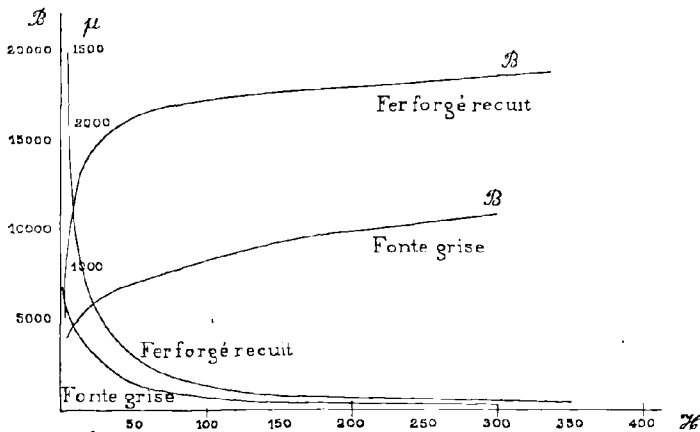


Fig. 106.

par 2Φ , donne le flux à travers les bobines B. Si n est le nombre total de spires et s la section du fer embrassée par une spire, on a :

$$(73) \quad \mathcal{B} = \frac{\Phi}{ns}.$$

On a ainsi \mathcal{B} et \mathcal{H} et on peut tracer la courbe de \mathcal{B} en fonction de \mathcal{H} , ou de $\mu = \frac{\mathcal{B}}{\mathcal{H}}$ fonction de \mathcal{B} ou de \mathcal{H} . La figure 106 donne l'allure générale des courbes de \mathcal{B} et de μ en fonction de \mathcal{H} .

Tracé d'un cycle d'hystérésis par points. — On donne à l'échantillon la forme d'un tore, sur lequel on enroule deux circuits identiques à ceux du § précédent ; les bobines B sont montées comme dans le cas indiqué. Le montage du primaire dépend du mode opératoire. Nous indiquerons deux procédés :

1° *Méthode de Rowland.* — Dans cette méthode on fait varier brusquement le courant (donc le champ \mathcal{H}) d'une valeur à l'autre et on mesure la variation de \mathcal{B} correspondante. Le montage étant celui des figures 107, et 100 ou 101, on commence par désaimanter l'échantillon

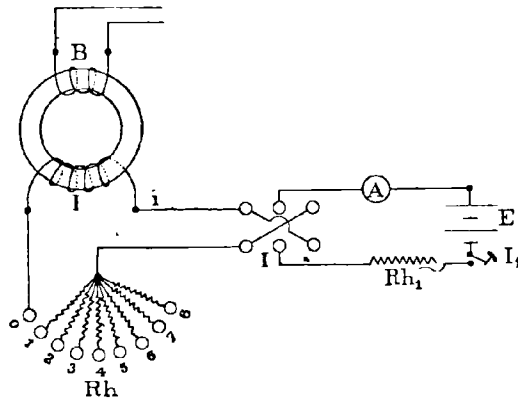


Fig. 107.

(voir page 173) ; on donne ensuite au courant i la valeur correspondant au champ maximum \mathcal{H}_m [formule (65) ou (65')]. On agit, pour cela, sur le rhéostat Rh_1 , le rhéostat Rh ayant la valeur la plus faible (tous les cavaliers en place). On enlève brusquement dans Rh le premier cavalier de droite, ce qui fait passer le courant de i_m à une valeur i , et on observe l'élongation du balistique.

La formule (65) ou (65') nous donne la nouvelle valeur de \mathcal{H} , et la formule (69) ou (71), la variation $\Delta\Phi$ du flux, d'où on déduit la variation de l'induction par la formule

$$(73') \quad \Delta\mathcal{B} = \frac{\Delta\Phi}{n_1 \cdot s}$$

n , étant le nombre de spires de la bobine B et s la section du fer du tore) (1).

On enlève ensuite le deuxième cavalier de droite, ce qui fait passer le courant de la valeur i à une valeur i' plus faible, et on mesure la nouvelle variation $\Delta\mathcal{B}$, etc... ; lorsque le dernier cavalier a été enlevé (courant nul) on inverse les connections à l'aide de l'inverseur I. On place ensuite successivement les cavaliers dans l'ordre inverse du précédent (de gauche à droite), on mesure chaque fois la valeur de i et de $\Delta\mathcal{B}$. Une fois tous les cavaliers introduit, on recommence l'opération comme avant. Lorsqu'on aura de nouveau enlevé les cavaliers, inversé le courant, puis remis tous les cavaliers, on aura tous les points du cycle.

Pour le tracer, on prendra sur une feuille de *papier millimétré* l'axe des \mathcal{B} vertical, à partir duquel on compte les \mathcal{H} . On part d'un point

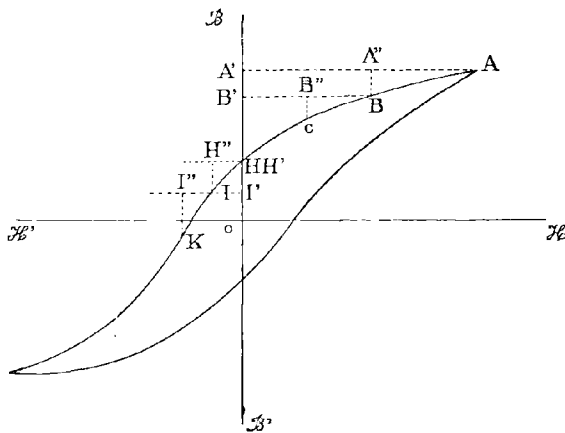


Fig. 103.

A situé à distance \mathcal{H}_m de cet axe, à échelle convenable, (fig. 103) et vers le haut de la feuille ; ce point constitue un des sommets du cycle. Sur $A'A$ et à partir de l'axe $\mathcal{B}\mathcal{B}'$ on prend une longueur égale à la première valeur obtenu pour \mathcal{H} , et du point A' ainsi obtenu on prend, sur une droite

(1) Pour avoir cette section, il faut mesurer au *palmer* l'épaisseur de chaque tôle avant de l'avoir verni ; on fait cette mesure en plusieurs points et on prend la moyenne des résultats.

parallèle à $\mathcal{B}\mathcal{B}'$, une longueur égale à la première valeur de $\Delta\mathcal{B}$. On obtient le point B qui est le deuxième point du cycle. A partir de B on fait les mêmes opérations qu'avant ... et ainsi de suite. Une fois le cycle obtenu, on trace l'axe des $\mathcal{J}\mathcal{C}$ à égale distance verticale des deux sommets.

Cette méthode a l'avantage d'être relativement simple. Elle donne des résultats exacts, si on la fait avec soins, de façon à ne pas faire des erreurs grossières ⁽¹⁾, et si l'échantillon employé ne présente pas de *trainage magnétique*.

2° *Méthode d'Ewing*. — Dans cette méthode on fait toujours varier le courant i à partir de i_m ; les divers points du cycle sont donc obtenus indépendamment l'un de l'autre.

Le montage est celui de la figure 109. L'inverseur I_1 sert à inverser le courant; le commutateur c joue un rôle important: lorsqu'il est placé sur les plots (2,3), I_2 étant fermé, le courant a la valeur maxima i_m ; si I_2 est ouvert, on a un courant i dont la valeur dépend de R_h . Lorsqu'au contraire c est placé sur (1,2) le courant est toujours $-i_m$ (le maximum de sens contraire).

Le mode opératoire est le suivant: on place c sur (2,3) on ferme I_1 et I_2 et on règle R_{h1} pour avoir la valeur voulue pour i_m . On donne ensuite une certaine valeur à R_h , on ouvre brusquement I_2 et on relève l'élongation du balistique. On fait passer c sur (1,2), on ferme I_2 et on revient sur (2,3) (cette opération a pour but de faire décrire au fer toujours des cycles entre i_m et $-i_m$).

On règle de nouveau R_h pour avoir un nouveau point... et on continue comme avant jusqu'à ce que le rhéostat R_h soit arrivé au plot mort (courant nul). On obtient ainsi un quart du cycle.

Pour obtenir le deuxième quart on fait passer c de (2,3) à (1,2) et on inverse I_1 , I_2 étant ouvert. On donne à R_h la plus grande valeur, on fait passer brusquement c de (1,2) à (2,3) et on relève l'indication du balis-

(1) D'après le mode opératoire, l'exactitude d'un point dépend de celle de tous les autres. On a prétendu que, dans cette méthode, les erreurs sur les points s'ajoutent; ceci n'est pas exact, les erreurs ayant autant de chances de s'ajouter que de se retrancher. En réalité la méthode est bonne, tant qu'il n'y a pas de *trainage* (pour les tôles, par exemple).

tique. Dans cette opération, on est passé du maximum i_m à la valeur i , qui est de sens contraire à i_m . On ferme I_2 et on déplace c de (2,3) à (1,2) — pour décrire le cycle — ensuite on donne à R_h une nouvelle valeur, on ouvre I_2 ... et on continue les opérations comme avant. Lorsque tous les points de ce quart de cycle ont été obtenus, on ferme I_2 on fait passer c

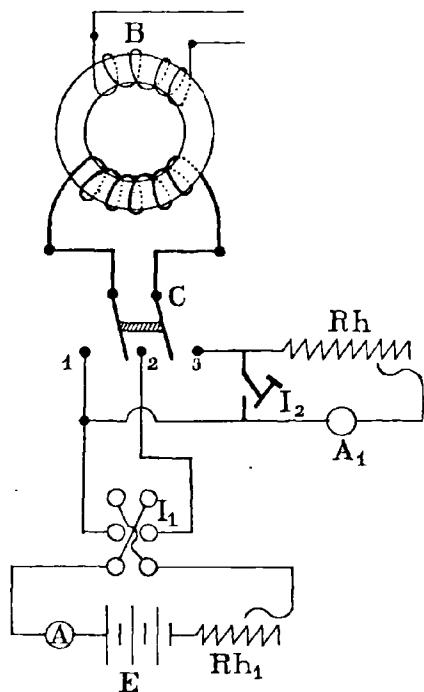


Fig 109.

de (1,2) à (2,3) et on relève l'élongation du balistique qui nous donnera $2\mathfrak{B}_m$. Le 3^e quart s'obtient comme le 1^e, le 4^e comme le 2^e.

Pour tracer le cycle, on opère comme pour la méthode précédente, mais en partant toujours de A.

Dans cette méthode l'erreur sur un point n'a pas d'influence sur les autres, le *traînage magnétique* gêne moins, parce qu'il n'altère que les résultats pour les faibles inductions. M. Jouaust (1) a montré, qu'on peut

(1) *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, Décembre 1904.

éviter le trainage, en revenant chaque fois de i à i_m , et en relevant à ce moment l'élongation du balistique.

Ce mode opératoire est plus simple que le précédent, seulement, il est facile de voir, que le fer est soumis à des cycles non symétriques par rapport à l'origine.

M. Jouaust a trouvé, que les résultats sont tout de même exact, si le courant i_m correspondent à une induction élevée.

Mais il est facile de suivre presque exactement le mode opératoire de Ewing, tout en évitant le *trainage*, de la façon suivante, qui est tout à fait rigoureuse : pour décrire un point de premier ou du 3^e quart du cycle, on place c sur (2,3) on ferme I_2 et on règle Rh , pour avoir la valeur voulue pour i_m . On donne une certaine valeur à Rh , on ouvre I_2 *sans s'occuper du balistique*. On attend quelques instants, pour que le flux ait le temps de prendre sa valeur — malgré le trainage. *On fait passer rapidement C sur (1,2) et on relève l'indication du balistique*. On revient sur (2,3) après avoir fermé I_2 , etc. Le mode opératoire pour le 2^e quart est facile à déduire de ce que nous avons dit dans la méthode Ewing.

En définitive, dans la dernière méthode, au lieu de relever l'élongation du balistique au moment où l'on passe d'un maximum du courant à la valeur i , on la relève lorsqu'on passe de cette valeur au maximum suivant.

Cette façon d'opérer donne des résultats exacts dès que la valeur de i_m correspond à une induction, pour laquelle l'échantillon ne présente pas de trainage.

Mesure des pertes d'énergie par hystérésis et courants de Foucault.

— Les pertes par hystérésis d'un échantillon peut se déduire du cycle d'hystérésis.

On a en effet :

$$(74) \quad W_H = \frac{V}{4\pi} \int_c \mathcal{H} d\mathcal{B} \quad \text{ou} \quad W_H = \frac{V}{4\pi} \cdot S,$$

W_H étant, en ergs, les pertes par cycle, V le volume de l'échantillon en cm^3 et $S = \int_c \mathcal{H} d\mathcal{B}$, la surface du cycle, si on prend les échelles de 1 centi-

mètre par gauss, pour \mathcal{H} et pour \mathcal{B} . Si les échelles sont de 1 centimètre pour un champ de h gauss et 1 centimètre pour une induction de b gauss on aura :

$$(75) \quad W_H = \frac{b \cdot h}{4\pi \cdot 10^7} \cdot V \cdot S,$$

W_H étant donné en *watts*.

Formule de Steinmetz. — En 1890 Steinmetz, après de nombreuses expériences, indiqua, pour le calcul des pertes par hystérésis, la formule :

$$(76) \quad W_H = \eta \cdot \mathcal{B}^{1,6},$$

W_H étant la perte d'énergie par cycle et par cm^3 , en ergs, \mathcal{B} l'induction maxima, en gauss, et η un coefficient, qui dépend de la qualité du fer.

Voici quelques valeurs de η (Formulaire Hospitalier) :

Fer très doux	$\eta = 0,002$		Acier doux fondu recuit : $\eta = 0,004$ à $0,005$	
Bonne tôle mince	$= 0,003$		Acier doux des machines	$0,008$
Tôle courante de transformateur : $0,0033$			Acier fondu	$0,012$
			Fonte	$0,013$
			Acier fondu trempé	$0,025$

La formule (76) est suffisamment exacte, dans la pratique, pour les fers de qualité moyenne et pour les valeurs de \mathcal{B} comprises entre 4 000 et 15 000 gauss.

Hystérésis alternative, hystérésis tournante. — Dans les expériences indiquées précédemment (page 177) le champ, auquel est soumis l'échantillon, garde la même direction, mais change de valeur et de sens. C'est ce qui se passe aussi, pour les tôles des bobines de réactance et des transformateurs.

Mais on peut aussi s'arranger, pour que l'échantillon soit soumis à un champ, le même en tous les points, qui garde constamment la même valeur numérique, mais dont la direction tourne d'un mouvement uniforme autour d'un axe. On aura, dans ce cas, encore des phénomènes

d'hystérésis, mais différents des précédents. C'est ce qu'on appelle *l'hystérésis tournante*, la première étant *l'hystérésis alternative*.

Dans les dynamos et en général dans les pièces tournantes des machines, on a un mélange des deux hystérésis. Au-dessous de $\mathfrak{B} = 15\ 000$ gauss les pertes par hystérésis tournantes sont plus grandes que celles par hystérésis alternatives — au-dessus elles décroissent et pour 20 000 gauss environ elles s'annulent.

Méthode de mesure directe des pertes par hystérésis et courants de Foucault. — Avant d'indiquer cette méthode, nous allons rappeler, qu'on doit prendre, dans les mesures, certaines des précautions indiquées page 173, et aussi, qu'il faut tenir compte du phénomène de *vieillessement*. Certaines tôles peuvent donner, lorsqu'elles sont neuves, de faibles pertes par hystérésis, mais ces pertes augmentent en service — on dit que les tôles vieillissent. Il serait donc bon de faire une mesure, sans rien changer à l'état du métal et ensuite une deuxième mesure, après l'avoir fait vieillir artificiellement. Pour cela, les échantillons seront recuits à l'étuve ou au bain d'huile, pendant 50 heures environ, à une température voisine de 140°C (la température de vieillissement dépend de l'échantillon, elle est en général comprise entre 100° et 200° — et il faut refaire l'expérience plusieurs fois à des températures différentes pour trouver celle qui convient).

Méthode du Wattmètre. — On fait le montage (fig 110)⁽¹⁾. On emploie habituellement un poids de tôles d'environ 10 kilogrammes, pour que la puissance perdue en hystérésis soit mesurable avec assez de précision. Les tôles doivent être vernies et isolées entre elles au papier de soie — l'isolement doit être fait avec soin, autrement on risque d'avoir trop de pertes par courants de Foucault. Le fil enroulé sur le tore contiendra environ 200 spires d'un fil de fort diamètre, pour que sa résistance totale soit faible (par exemple de 3 à 4 mm² de section). Le *wattmètre* devra avoir un fil,

(1) Au Laboratoire Central d'Électricité on emploie, pour ces mesures, des rondelles de tôles de 30 centimètres de diamètre extérieur et 3 centimètres d'épaisseur radiale.

fin à faible coef. de self. (parce que le $\cos \varphi$ du circuit est faible (voir page 24) et une sensibilité appropriée. ⁽¹⁾)

La mesure se fait, en relevant les *volts* efficaces (U), les *ampères* efficaces (I) et les *watts* (W_1), pour une série de valeurs du courant. On mesure ensuite la résistance (R), à chaud, du circuit CEFGD, en y faisant

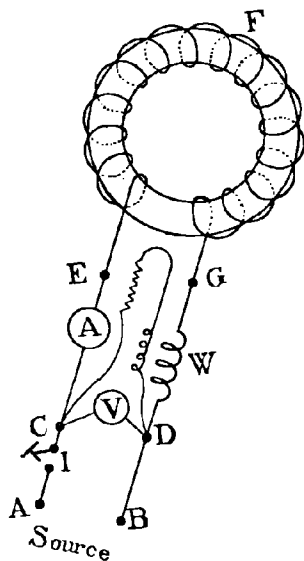


Fig 110.

passer un courant continu, égal à la valeur efficace du courant alternatif, et en mesurant la diff. de pot. par un voltmètre approprié.

De ces mesures on déduit :

La f. contre e. m. efficace E du primaire, par la formule :

$$(77) \quad E = U - \frac{R \cdot W_1}{E}$$

⁽¹⁾ La maison Siemens et Halske construit, pour ces mesures, un wattmètre spécial, à 2 sensibilité pour les ampères (2,5 — 5 ampères) et une de volts (60 volts), et donnant toute la gradation pour 60 volts et 2,5 ou 5 ampères, suivant la sensibilité, et pour $\cos \varphi = 0,5$.

l'induction maxima $\mathfrak{B}m$, par la formule

$$(78) \quad \mathfrak{B}m = \frac{E \cdot 10^8}{\pi n N S \sqrt{2}}$$

si E est sinusoïdale ou .

$$(78') \quad \mathfrak{B}m = \frac{E \cdot 10^8}{4\pi N S \cdot f}$$

dans le cas général, f étant le facteur de forme de E (page 140), n le nombre de spires de l'enroulement, N la fréquence du courant, S la section du fer. Les pertes dans le fer W par la formule :

$$(79) \quad W = W_1 - R I^2$$

On peut séparer approximativement les pertes W_H par hystérésis et W_F par courants de Foucault, en faisant la mesure à deux fréquences différentes. On a en effet

$$W_H = \alpha \cdot N \cdot \mathfrak{B}_m^{1,6} \quad \text{et} \quad W_F = \beta N^2 \mathfrak{B}_m^2$$

donc

$$W = \alpha N \mathfrak{B}_m^{1,6} + \beta N^2 \mathfrak{B}_m^2.$$

Deux mesures permettent donc de trouver α et β .

Pour que la méthode soit exacte et assez simple il faut que la f. contre e. m. E soit sinusoïdale. Pour cela il faut, que l'alternateur qui produit le courant ait une f. e. m. sinusoïdale, qu'il débite un courant faible par rapport à son courant maximum (pour que sa réaction d'induit soit faible) et que la résistance totale du circuit soit faible. Si ces conditions ne sont pas remplies, il faudra connaître la forme de la courbe de E, pour avoir le facteur de forme f .

La Société des électriciens allemands recommande, qu'on fasse l'essai avec un courant de fréquence $N = 50$ périodes, et sous l'induction maxima $\mathfrak{B}m = 10\,000$ gauss. La puissance totale absorbée doit être inférieure à 4,4 watts par kilogramme de fer, ce qui correspond à $\eta = 0,00287$ (1).

(1) Il est préférable de faire deux mesures : une à $\mathfrak{B} = 10\,000$ et une à $\mathfrak{B} = 15\,000$ gauss. Pour les inductions élevées on emploie une méthode de mesure un peu différente de celle indiquée (voir : ARMAGNAT : Observations sur les mesures magnétiques. *Bulletin de la Société Internationale des Électriciens*, Juillet 1911).

APPAREILS DE MESURES

Fluxmètres Grassot (fig. 111 et 112) (1). — Cet appareil est destiné à la mesure pratique des variations de flux ; il peut donc remplacer le galvanomètre balistique, dans les méthodes indiquées et chaque fois qu'il s'agit de mesurer la variation d'un flux.

Le fluxmètre est un galvanomètre balistique, dans lequel le couple de torsion est rendu négligeable et le couple d'amortissement très grand.

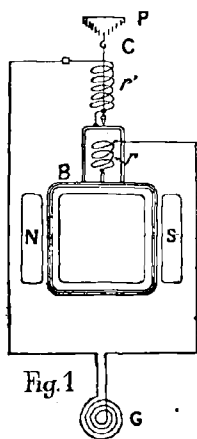


Fig. 111.

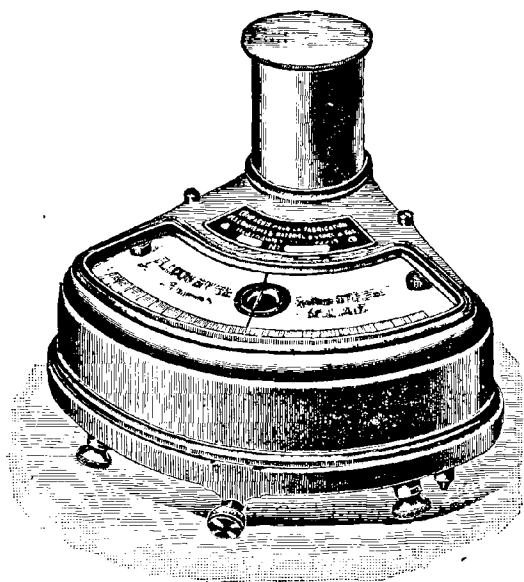


Fig. 112.

La figure 112 donne le schéma du montage. Le cadre mobile B est suspendu par un fil de cocon, à couple de torsion très faible, et on lui amène le courant à l'aide de deux spirales en argent, très fines, de façon que le couple de torsion total soit négligeable.

La bobine G, dont on mesure la variation, doit avoir une faible résistance, parce la résistance totale du circuit doit être faible, pour avoir un fort amortissement. L'équipage mobile porte une aiguille qui se déplace

(1) Construit par la C^{ie} des Compteurs.

devant une graduation ; elle peut aussi porter un miroir qui permet d'employer une échelle graduée.

Le principe de l'appareil est le suivant :

L'équation du mouvement du cadre mobile est (fascicule 20, page 75),

$$(80) \quad K \frac{d^2 x}{dt^2} + A \frac{dx}{dt} = D i,$$

i étant le courant dans le cadre. Ce courant étant induit dans le circuit par la variation $\frac{d\Phi}{dt}$ du flux, on a :

$$(81) \quad R i + L \frac{di}{dt} = - \frac{d\Phi}{dt},$$

R et L étant la résistance et le coef. de self. du circuit. Si on intègre les deux relations (80) et (81) entre deux instants t_1 et t_2 on a :

$$(82) \quad K \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) + A (x_2 - x_1) = D \int i dt$$

et

$$(83) \quad R \int_{t_1}^{t_2} i dt + L (i_2 - i_1) = - \Delta\Phi,$$

$\Delta\Phi$ étant la variation totale du flux pendant le temps $(t_2 - t_1)$.

Le fluxmètre sert surtout à mesurer une variation de flux entre deux valeurs constantes de celui-ci : il résulte de là qu'on a : $i_1 = i_2 = 0$, $\frac{dx_1}{dt} = \frac{dx_2}{dt} = 0$, et les équations (82) et (83) deviennent :

$$A (x_2 - x_1) = D \int i dt \quad \text{et} \quad R \int i dt = - \Delta\Phi,$$

d'où on tire en posant $x_1 - x_2 = x$,

$$(84) \quad \Delta\Phi = \frac{AR}{D} \cdot x.$$

Or, on a vu (fasc. 20, page 65), que $A = A_0 + \frac{\Phi_0^2}{R}$ donc

$$(84) \quad \Delta\Phi = \frac{A_0 R + \Phi_0^2}{D} \cdot x.$$

Si R est assez petit A_0R est négligeable devant Φ_0^2 et on a :

$$(84') \quad \Delta\Phi = \frac{\Phi_0^2}{G} \alpha.$$

La variation du flux est donc proportionnelle à la déviation du fluxmètre, la constante de l'appareil étant, dans certaines limites, indépendante de la résistance R .

Perméamètres et Balances magnétiques. — L'emploi du tore n'est pas commode pour l'industrie, parce qu'on doit faire, pour chaque échantillon, deux enroulements bien réguliers et faits à la main, ce qui est trop long. On a donc imaginé des appareils, dans lesquels les bobines sont faites d'avance et l'échantillon a la forme d'une tige de faible longueur (20 à 50 centimètres). La plupart de ces appareils, donnent des résultats peu exacts et non comparables entre eux, pour les trois motifs suivants : 1° Pour fermer le circuit magnétique on emploie des masses magnétiques de forte section, pour avoir une reluctance négligeable (*court-circuit magnétique*) ; seulement, il arrive qu'à cause de la forte section, l'induction dans ces *culasses* est faible ; il en résulte que leur *perméabilité est faible* et leur reluctance n'est pas négligeable ; 2° Les contacts entre l'échantillon et les culasses constituent des *joints*, dont la reluctance n'est pas négligeable : un bon joint a encore la reluctance d'environ 10 centimètres de fer de même section ; 3° Le champ dans l'échantillon n'est pas uniforme.

Deux appareils pourtant, le *Perméamètre Picou* et le *Perméamètre Iliovici* ⁽¹⁾ donnent des résultats comparables entre eux et pratiquement exacts. Nous allons décrire le *Perméamètre Picou* et la *balance magnétique de Du Bois*.

1° *Perméamètre Picou* (fig. 113 et 114) ⁽²⁾. — Il se compose de deux culasses en tôles C_1C_2 , entre lesquelles on serre l'échantillon e , en tôles

(1) Nous ne pouvons pas décrire le Perméamètre Iliovici, parce qu'il n'a pas encore pris sa forme définitive. L'appareil, construit par la Compagnie des compteurs, sera décrit ultérieurement dans une Revue d'Electricité.

(2) Construit par Carpentier.

ou en forme de paralipipède massif (on s'arrange pour que la section du fer soit de 1 cm^2). Sur chaque culasse et sur l'échantillon, se trouvent enroulées trois bobines à gros fil : B_1 , B_2 et b , et trois bobines à fil fin : S_1 , S_2 et s . Les bobines B_1 , B_2 , qui ont le même nombre de spires, sont en série entre elles et en série avec le gros fil d'un petit transformateur T à entrefer variable, avec un rhéostat R_c et avec un inverseur I_1 solidaire

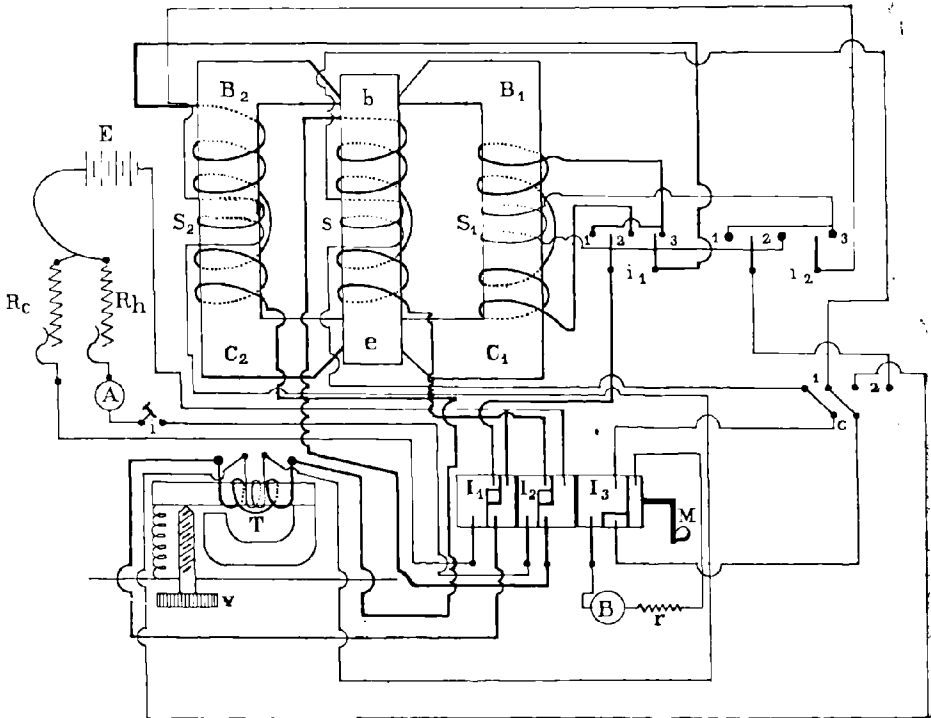


Fig 113.

de deux autres, dont nous nous occuperons. Un inverseur i_1 permet de faire passer le courant dans B_1 , dans un sens ou dans l'autre.

La bobine b est en série avec un rhéostat R_h , un ampèremètre A , un interrupteur et l'inverseur I_2 . Une source E , formé de quelques accumulateurs, par exemple 6 accus, fournit le courant dans les deux circuits en parallèles.

Les bobines à fil fin S_1 , S_2 , qui ont le même nombre de spires, sont en

série avec le fil fin du transformateur T ; un inverseur i_2 permet d'inverser les connections de S_1 . La bobine s est seule. Un commutateur c sert à amener aux bornes d'un balistique B les circuits des bobines S_1 , S_2 , ou celui de la bobine s — en passant par l'inverseur I_3 . La vis v sert à régler l'entrefer du transformateur T. L'inverseur I_3 sert à changer les connections du galvanomètre entre deux inversions de courant de façon que les courants induits le traverse toujours dans le même sens.

Pour faire une mesure, on commence par donner une valeur appropriée au rhéostat R_c , l'interrupteur i étant ouvert. Le courant passe dans les bobines B_1 et B_2 et dans le gros fil du transformateur ; les culasses C_1 et C_2 sont parcourues par des flux magnétiques, et on place i_1 de façon que ces flux soient en série. Les bobines B_1 et B_2 ayant le même nombre de spires et les culasses C_1 et C_2 étant identiques, si on s'arrange pour avoir

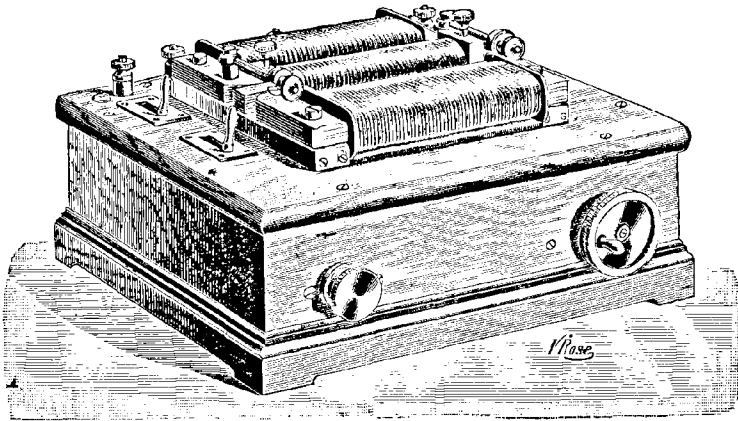


Fig. 114.

des joints assez bons et pratiquement identiques, les extrémités b et e de l'échantillon seront, par raison de symétrie, au même *potentiel magnétique*. Il ne passera donc aucun flux dans l'échantillon et les culasses seront parcourues par le même flux $\frac{\Phi}{2}$ ⁽¹⁾. On ne mesure pas ce flux,

(1) Pour vérifier si ces conditions sont remplies, il suffit de placer le commutateur c sur 1 et de faire tourner les inverseurs I_1, I_2, I_3 , à l'aide de la manette M ; le balistique doit rester au zéro.

mais on le *repère* ; pour cela on règle l'entrefer du transformateur T jusqu'à ce que, le commutateur *c* étant dans la position 2, le balistique reste au zéro, lorsqu'on fait tourner la manette M (1). Dans cette opération chacune des bobines B₁ et B₂ a produit la f. m. m. nécessaire pour faire passer le flux $\frac{\Phi}{2}$ dans la culasse correspondante et dans deux joints.

On change la position des inverseurs *i*₁ et *i*₂, le flux dans la bobine B₁ change de signe ; les deux flux, dans B₁ et B₂, sont donc en opposition et viennent se joindre pour passer dans l'échantillon. Les reluctances à vaincre sont plus grandes et le flux dans les culasses diminue. Pour le ramener à la même valeur $\frac{\Phi}{2}$, on ferme l'interrupteur *i* et on règle le rhéostat R_R, jusqu'à ce, qu'en faisant tourner M, le balistique reste de nouveau au zéro.

Dans cette expérience, la f. m. m. de chaque bobine B₁ et B₂ étant restée la même qu'avant, elle sert à faire passer le flux $\frac{\Phi}{2}$ dans une culasse et deux joints — comme avant. La f. m. m. de la bobine *s* fait donc passer le flux $\Phi = 2 \cdot \left(\frac{\Phi}{2}\right)$ dans l'échantillon sans joints.

Si \mathcal{H} est le champ dans l'échantillon, *l* sa longueur utile, \mathcal{F} la f. m. m. de la bobine *b*, on aura : $\mathcal{H} \cdot l = \mathcal{F}$ d'où $\mathcal{H} = \frac{\mathcal{F}}{l} = \frac{0,4\pi n_1 I}{l}$ (2).

Chaque appareil ayant son ampèremètre, on gradue celui-ci directement en unités de champs. [La longueur utile de l'échantillon est de 15^{cm}, 6 le nombre de spires $n_1 = 2480$ spires].

Pour avoir Φ [ou plutôt \mathcal{B} , parce que le nombre de spires de la bobine à fil fin *s* étant connue (100 spires) ainsi que la section du fer (1 centimètre), on peut graduer le balistique directement en unités de \mathcal{B}] on fait faire à M un demi-tour, ce qui inverse tous les courants et le balistique donne une élévation proportionnelle à 2 Φ .

(1) La f. e. m. induite dans le secondaire du transformateur est de sens contraire de celle induite dans les bobines B₁ et B₂ ; si le balistique reste au zéro, c'est que les deux f. e. m. sont égales. Si, à partir de ce moment on ne touche plus à la vis *v*, on aura le même flux $\frac{\Phi}{2}$ chaque fois qu'on aura le zéro au balistique.

(2) Il serait plus exact de remarquer, que les extrémités *b* et *c* sont au même potentiel, comme dans la première expérience; on a donc $\mathcal{H}l = \mathcal{F}$, d'après la formule (65).

L'appareil comporte un balistique gradué directement en B. La figure 114 représente la vue du perméamètre seul. L'appareil contient, en plus, le balistique, un rhéostat et un ampèremètre.

Balance magnétique Du Bois (fig. 115 et 116) (1). — On a utilisé l'attraction, qui s'exerce entre des pièces aimantées. L'échantillon à

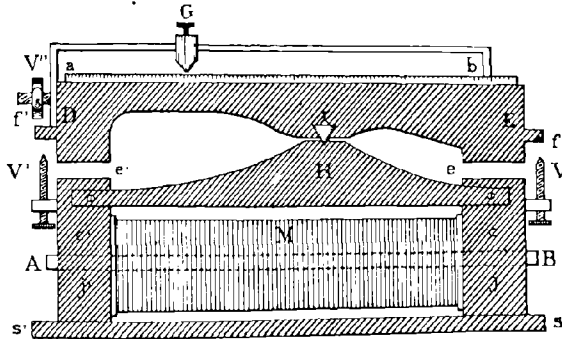


Fig. 115.

essayer est placé dans une bobine magnétisante M et serrée entre deux

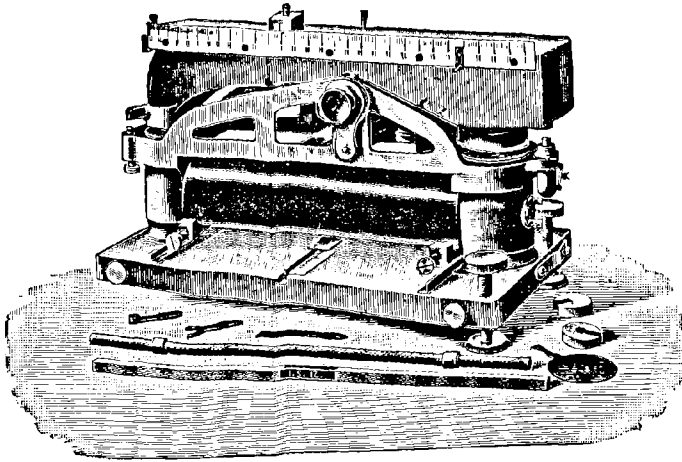


Fig. 116.

blocs *c* et *c'*. Un fléau DE, formé d'un bloc d'acier, a ses extrémités au-

(1) Construite par Siemens et Halske.

dessus de cc' , avec lesquels il forme deux entrefers, d'épaisseur d'environ 1 millimètre.

Lorsque la bobine est excitée, les attractions sont égales des deux côtés, mais l'axe du fléau n'étant pas en son milieu, il y a attraction du côté gauche et, pour rétablir l'équilibre, on déplace le contrepoids G . L'induction \mathfrak{B} est proportionnelle à la racine carrée du déplacement du contrepoids. Un ampèremètre permet de mesurer le courant d'excitation, d'où on déduit \mathfrak{C} .

Hystérésimètres. — Les hystérésimètres sont de deux genres : 1° Les appareils d'Ewing, Blondel, etc., qui permettent de mesurer le coefficient γ de Steimuetz ; 2° Les appareils de Möllinger, Epstein et Siemens et Halske, qui sont des dispositifs pour l'application pratique de la méthode du wattmètre (voir page 183).

Hystérésimètre Ewing (fig. 117) (1). — Dans cet appareil l'échantillon E , formé de 6 à 8 tôles de $76,5 \times 15,9^{\text{mm}^2}$ de surface et de faible épaisseur, est placé sur un support spécial, qui peut tourner autour d'un axe O , perpendiculaire au plan des tôles. On produit la rotation à l'aide d'une manette M .

Un aimant permanent A , monté sur couteaux, porte une aiguille a , qui se déplace devant une graduation G . L'appareil comporte aussi des poids de réglage, qui ne sont pas indiqués sur la figure, et une palette qui se déplace dans une cavité c remplie d'huile, qui sert à amortir les oscillations de la partie mobile.

L'aimant et l'échantillon forment un circuit magnétique, ayant deux entrefers, qu'on rend assez grands pour que l'induction de l'échantillon soit indépendante de la perméabilité de celui-ci. Cette induction est de 4 000 gauss environ.

En faisant tourner l'échantillon, il tire sur l'aimant tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, mais, à cause de l'hystérésis, l'attraction est plus forte dans un sens et donne naissance à un couple, qui fait incliner l'aimant d'un angle correspondant. Ce couple est proportionnel à la perte

(1) Construit par Elliott Bros. (Londres).

par hystérésis par cycle ; il est, pratiquement, indépendant de la vitesse de rotation, tant que les pertes par courants de Foucault sont négligeables. Le constructeur fournit deux échantillons étalons, l'un à pertes faibles ($\gamma = 0,001$), l'autre à fortes pertes ($\gamma = 0,004$). Pour faire une mesure, on cherche les déviations correspondantes aux deux échantillons. On trace sur une feuille de papier une droite passant par les deux points obtenus, en prenant en abscisse la valeur de γ et en ordonnées les *déviations* corres-

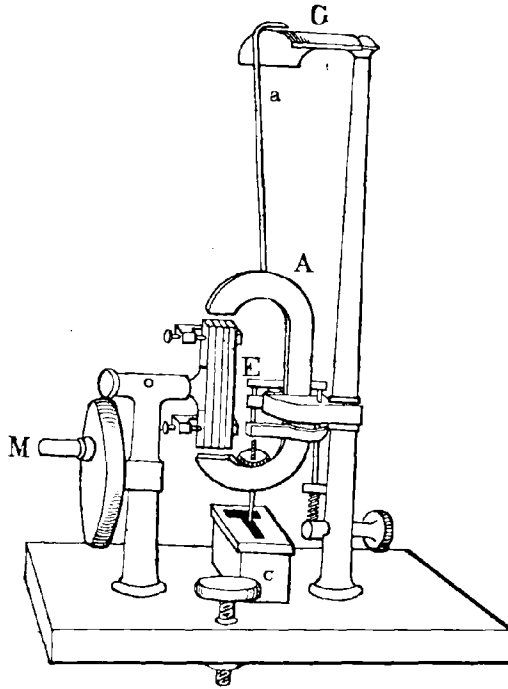


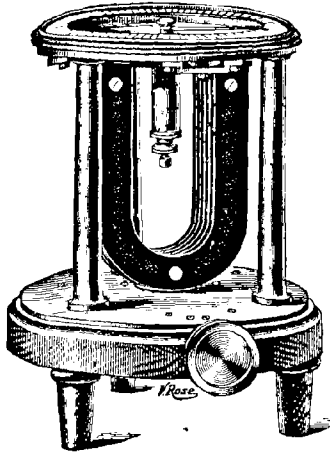
Fig. 117.

pondantes. On cherche ensuite la déviation correspondante à l'échantillon à essayer. Le point représentatif correspondant se trouve sur cette droite.

Hystérésimètre Blondel (fig. 118) (1). — Dans cet appareil, l'échantillon, formé d'anneaux de tôles de 38 millimètres de diamètre intérieur,

(1) Construit par Carpentier.

55 millimètres de diamètre extérieur et en nombre suffisant pour avoir une épaisseur de fer de 4 millimètres environ, est placé sur un support spécial, à la partie supérieure de l'appareil. Ce support entraîne un ressort qui fournit le couple antagoniste. Un aimant permanent, en forme de fer à cheval, peut tourner et entraîne l'échantillon. Le couple, qui s'exerce entre celui-ci et l'aimant, est *proportionnel* à la perte par hys-



F. g. 118.

térésis par cycle, et on a une déviation proportionnelle à cette perte. L'induction dans l'échantillon est de 10 000 gauss environ. Le constructeur fournit un échantillon étalon.

L'hystérésimètre Ewing donne des pertes par hystérésis alternative, celui de Blondel donne un mélange d'hystérésis alternative et d'hystérésis tournante.

Hystérésimètre Möllinger (fig. 119) (1). — Cet appareil permet l'emploi de rondelles de tôles sans joints. Ces rondelles sont percées de trous, par lesquels on fait passer des tiges servant à les guider. L'enroulement est formé d'un certain nombre de spires, ayant chacune, à l'une des extrémités un petit cylindre arrondi et à l'autre, une pince pouvant

(1) Construit par Siemens et Halske.

saisir l'un de ces cylindres. Pour faire le montage, on introduit chaque cylindre d'une spire dans la pince de la spire voisine ... et on monte toutes les spires en série.

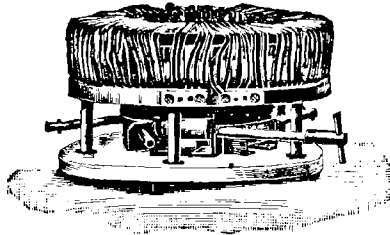


Fig. 119.

Hystérésimètre Epstein (fig. 120). — Cet appareil se compose d'un cadre carré en bois, contenant 4 bobines identiques ayant chacune 150 spires sur une longueur de 40 centimètres environ, et une résistance 0,04 ohms.

Dans les quatre coins du cadre se trouvent des pinces d'assemblage, qui servent au serrage des tôles ; celles-ci sont découpées en bandes de

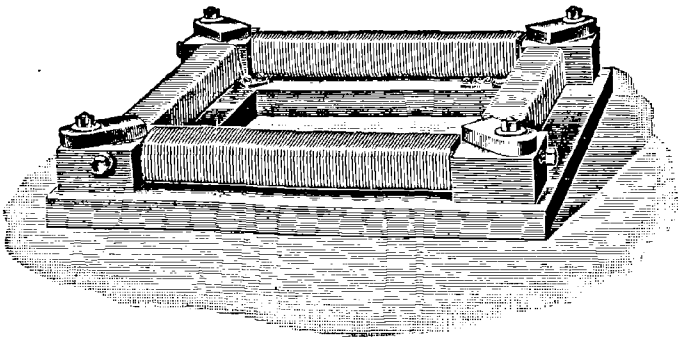


Fig. 120.

50 centimètres de longueur et de 8 centimètres de large ; on en fait 4 paquets aussi semblables que possible — le poids de l'ensemble étant d'environ 10 kilogrammes. Les tôles sont isolées entre elles ; on les groupe par 8 à 12, on enveloppe l'ensemble dans du papier assez fort. On empile les paquets ainsi formés les uns sur les autres et on les place dans des bobines magnétisantes. Les extrémités des paquets sont rendues

bien planes et pour assurer l'égalité des joints ⁽¹⁾ on place dans chacun d'eux une feuille de prespahn de 0^{mm},15. Cet appareil paraît répondre le mieux aux besoins de la pratique ⁽²⁾.

4° *Hystérésimètre de Richter* ⁽³⁾. — Cet appareil permet la mesure des pertes sur des tôles de grandes dimensions telles qu'elles sortent des laminoirs. Il se compose d'un cadre en bois muni d'un enroulement magnétisant.

Les tôles introduites s'enroulent en forme de cylindre ; elles sont isolées à la gomme-laque. Les extrémités, qui forment joints, sont enveloppées de papier.

Remarque intéressante. — D'après les expériences faites par Gumlich et Rose ⁽⁴⁾, l'appareil d'Epstein donnerait des résultats exacts pour les pertes totales, mais des résultats trop forts de 3 % pour les pertes par hystérésis ; avec l'appareil de Mollinger toutes les pertes seraient trop faibles de 2 % ; avec l'appareil de Richter les pertes par hystérésis seraient obtenues d'une façon exacte et les pertes totales seraient de 3 % trop faibles.

(1) L'égalité des joints est utile pour avoir un champ plus uniforme.

(2) Dans les appareils employés au Laboratoire Physicothecnique de Charlottenbourg les tôles n'ont que 3 cm. de largeur. Il existe des variantes de l'appareil d'Epstein. Epstein lui-même a construit récemment un appareil dans lequel on enroule plusieurs bobines, réparties le long de l'échantillon et montées en parrallèle. Cette disposition a pour effet de rendre plus uniforme l'induction dans l'échantillon, mais complique l'appareil. (Voir aussi : Armagnat. Article cité).

(3) Construit par Siemens et Halske.

(4) *Electrotechnisches Zeitschrift* (25 avril 1905).

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE PREMIER

Mesure des Puissances

	Pages
Définitions et formules. — Cas particuliers. — Unités	1 à 6

MÉTHODES DE MESURES

Courant continu. — Courant alternatif	6 à 8
---	-------

WATTMÈTRES

Wattmètres électrodynamiques. Principe. — Montage des wattmètres. — Circuit à deux fils. — Circuits à plusieurs fils (monophasés ou polyphasés). — Circuits monophasés à deux ponts. — Circuits diphasés. — Circuits triphasés à 3 fils. — Méthode des deux wattmètres. — Circuit triphasé à 4 fils. — Emploi des transformateurs	11 à 20
---	---------

CAUSES D'ERREUR DANS LES WATTMÈTRES

Avantages et inconvénients des wattmètres électrodynamiques . .	25
---	----

DESCRIPTION DE QUELQUES APPAREILS

Wattmètre Carpentier. — Wattmètre Weston. — Wattmètres Siemens et Halske	26 à 30
--	---------

WATTMÈTRES A INDUCTION OU A CHAMP TOURNANT

Montage. — Avantages et inconvénients.	33
--	----

CHAPITRE II

Appareils enregistreurs

	Pages
Appareil de mesure. — Système inscripteur. — Plumes. — Mouvement. — Diagrammes. — Enregistreurs Richard. — Enregistreurs Carpentier à ordonnées rectilignes. — Enregistreurs Chauvin et Arnoux à inscription discontinu. — Wattmètre enregistreur à servomoteur Olivetti.	36 à 44

CHAPITRE III

Mesure de l'Energie Electrique

Généralités. — Méthodes de mesure. — Unités	43
---	----

COMPTEURS

Conditions que doit remplir un bon compteur	47
---	----

COMPTEURS ÉLECTRO-CHIMIQUES. COMPTEURS ÉLECTRO-MÉCANIQUES.	51
--	----

COMPTEURS MOTEURS

Compteurs électromagnétiques. Compteurs non freinés (Compteur O'Kenan dit O'K). Description. — Théorie. — Compteurs électromagnétiques amortis. — Compteur de la Société Anonyme Française AEG type E. — Compteur Aron. — Compteurs à mercure. — Compteurs dynamoélectriques. — Compteurs à collecteurs (genre Elihu Thomson). — Emploi du fer	54 à 70
--	---------

DESCRIPTION DE QUELQUES APPAREILS

Compteurs de la Compagnie pour la fabrication des compteurs. — Compteur Vulcain. — Compteurs de la Société Française d'électricité A. E. G. — Compteur Lux. — Compteurs électrodynamiques à mercure (wattheuremètres)	71 à 76
---	---------

COMPTEURS D'INDUCTION OU A CHAMP TOURNANT

Allure générale de la courbe d'étalonnage. — Influence de $\cos \varphi$. — Influence de la fréquence et de la température. — Réglage d'un compteur d'induction. — Avantages et inconvénients des compteurs d'induction	90 à 94
--	---------

DESCRIPTION DE QUELQUES APPAREILS

Compteur A.C.T. 3. — Réglage. — Compteur « Cosinus » type M. R. — Réglage. — Compteur B. T., modèle I. — Réglage. — Compteur de la société Française d'électricité A. E. G. type L. J a. — Compteur Westinghouse. — Compteur Aron	94 à 104
---	----------

COMPTEURS A SERVOMOTEURS

Pages

Compteur à balancier Aron. — Principe. — Description du wattheuremètre à remontage électro-automatique. — Remontage. — Données numériques. — Avantages et inconvénients. — Compteurs oscillants	104 à 114
---	-----------

COMPTEURS TRIPHASÉS

Compteurs pour circuits à 3 fils. — Compteur triphasé A. C. T. — Compteur triphasé « Cosinus ». — Compteur B. T. — Compteurs pour circuits triphasé à quatre fils. — Compteurs A. C. T. « Cosinus », « BT », Aron.	116 à 120
--	-----------

QUELQUES SYSTÈMES DE TARIFICATION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE
COMPTEURS SPÉCIAUX

Compteur à double tarif. — Compteurs à dépassement. — Compteurs à prépayement ou automatiques	123 à 127
---	-----------

CHAPITRE IV

**Mesure d'un facteur de puissance et d'une différence de phase.
Phasemètres**

Définitions et formules. — Mesure d'un facteur de puissance. — Mesure d'un angle de phase entre deux courants, entre un courant et une diff. de pot. ou entre deux diff. de pot., faisant partie du même circuit ou de deux circuits différents. — Phasemètres. — Phasemètres donnant $I \sin \varphi$	130 à 133
--	-----------

CHAPITRE V

Mesure d'une fréquence. Fréquencemètres

Fréquencemètre Hartmann et Braun. — Fréquencemètre Abraham.	137
---	-----

CHAPITRE VI

Tracé et étude des courbes de courant alternatif. Facteur de forme

Facteur de forme. — Tracé d'une courbe de tension, d'intensité, etc. d'un courant alternatif. — Ondographe Hospitalier. — Oscillographes. — Rhéographe Abraham-Carpentier. — Analyse d'une courbe de courant alternatif	141 à 154
---	-----------

CHAPITRE VII

Transformateurs pour appareils de Mesures

Transformateurs de tension. — Transformateurs d'intensité . . .	156
---	-----

CHAPITRE VIII

Mesures magnétiques

	Pages
Définitions et formules. Champ magnétique. — Induction. — Flux d'induction. — Perméabilité. — Hystérésis. — Cycle d'hystérésis. — Définition pratique de la perméabilité. — Ligne de force. — Tube de force. — Force magnétomotrice d'une bobine. — Reluctance. — Diff. de pot. magnétique. — Unités. — Formules . . .	164 à 168

MÉTHODES DE MESURES

Mesure de la variation d'un flux. — Mesure d'un champ. — Mesure d'une perméabilité. — Tracé d'un cycle d'hystérésis. — Mesure des pertes d'énergie par hystérésis. — Formule de Steinmetz. — Hystérésis alternative, hystérésis tournante. — Méthode de mesure directe des pertes par hystérésis et courants de Foucault. — Méthode de wattmètre	168 à 185
--	-----------

APPAREILS DE MESURES

Fluxmètre Grassot. — Perméamètre Picou. — Balance magnétique Du Bois. — Hystérésimètres Ewing, Blondel, Epstein, Möllinger, Richter.	186 à 197
--	-----------