

PENDULES ÉLECTRIQUES

PAR

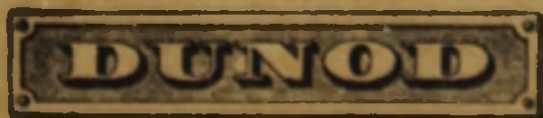
J. GRANIER

Professeur à la Faculté des Sciences de Besançon

A l'usage

de l'Enseignement technique supérieur

PARIS



92, RUE BONAPARTE (VI)

1935

PENDULES ÉLECTRIQUES

PENDULES ÉLECTRIQUES

PAR

J. GRANIER

Professeur à la Faculté des Sciences de Besançon

A l'usage

de l'Enseignement technique supérieur

PARIS



92, RUE BONAPARTE (VI)

1935

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation réservés pour tous pays.
Copyright by Dunod 1935

PENDULES ÉLECTRIQUES

PREMIÈRE PARTIE

HORLOGES A GRAVITÉ

CHAPITRE PREMIER

THÉORIE DU PENDULE

INTRODUCTION

Depuis que l'électricité a été appliquée à la mesure du temps, l'ingéniosité des horlogers s'est donné libre cours et l'on a imaginé un nombre considérable de pendules ; dans l'impossibilité d'examiner tous les systèmes proposés, nous nous bornerons à étudier ceux qui, tant du point de vue horloger que du point de vue électrique, donnent entière satisfaction.

En établissant la classification de ces pendules nous avons porté principalement notre attention sur le système oscillant et nous avons adopté dans notre exposé le plan suivant :

1 ^{re} Partie.	{	Ch. 1. Théorie du pendule.
Horloges à gravité		Ch. 2. Horloges à balancier pendulaire (à remontage et à entretien direct).
2 ^e Partie	{	Ch. 3. Théorie du système balancier-spiral ; pendulettes à remontage.
Horloges à élasticité		Ch. 4. Diapasons Quartz.
3 ^e Partie	{	Ch. 5. Récepteurs à période propre.
Distribution de l'heure		Ch. 6. Compteurs d'impulsions.

Nous allons donc aborder l'étude du pendule, en commençant par les cas les plus simples.

I. — PENDULE NON AMORTI PETITES AMPLITUDES

1. Calcul de la période. — Un pendule d'horloge est un solide de forme allongée pouvant osciller autour d'un axe horizontal (fig. 1). Pour étudier la loi suivant laquelle s'effectuent ses oscillations, supposons d'abord que celles-ci ont lieu sous l'influence de la pesanteur seule, toute cause perturbatrice, le frottement en particulier, étant éliminée.

Désignons par :

l , la distance du centre de gravité G à l'axe de suspension O ,

M , la masse du pendule,

g , l'accélération de la pesanteur,

θ , l'élongation (angle d'écart),

α , l'amplitude (élongation maxima),

I , le moment d'inertie autour de l'axe de suspension O .

Le couple dû à la pesanteur tend à ramener le pendule dans sa position d'équilibre et son moment a pour expression :

$$- Mg \cdot GA = - Mgl \sin \theta ;$$

l'équation du mouvement est par suite :

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = - Mgl \sin \theta.$$

1° Supposons que l'angle d'écart θ soit constamment assez faible pour qu'on puisse le confondre avec son sinus.

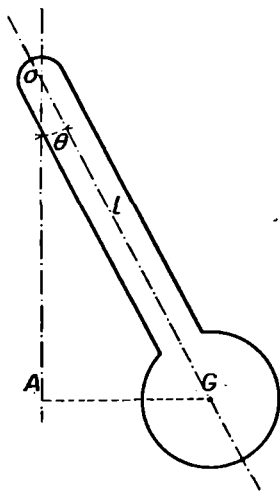


Fig. 1.

L'intégration de l'équation

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = -Mgl \theta$$

obtenue dans ces conditions est immédiate et donne :

$$\theta = \alpha \sin \sqrt{\frac{Mgl}{I}} t.$$

La période $T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{Mgl}}$ est indépendante de l'amplitude ; les petites oscillations sont « isochrones » (1).

Cas particulier. Pendule simple. — Supposons que la masse du pendule soit tout entière concentrée au point G (ce que nous pouvons réaliser grossièrement en constituant le pendule par une mince tige de bois terminée par une lourde lentille de laiton).

Le moment d'inertie a alors pour valeur :

$$I = Ml^2$$

et la période devient

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Cette période ne dépend, en un lieu déterminé, que de la longueur l . En adoptant pour g la valeur 981, on peut ainsi former un tableau reliant la période d'oscillation (double) d'un pendule simple à sa longueur.

T	l
2 sec.	99,39 cm.
3/2 55,91	
4/3 44,17	
1 24,82	
2/3 11,05	
1/2 6,21	

(1) L'isochronisme des petites oscillations découvert par Galilée et utilisé par lui en médecine (il s'en servait pour surveiller la fièvre de ses malades) ne fut appliqué à l'horlogerie que par Huyghens en 1657.

Ainsi, le pendule simple « battant la seconde » (c'est-à-dire effectuant en une seconde une oscillation *simple*) a une longueur voisine de 1 mètre ; pour battre la demi-seconde, il faut une longueur de 25 centimètres environ.

A tout pendule composé on peut évidemment faire correspondre un pendule simple synchrone. Précisons pour éviter toute confusion que la longueur de celui-ci est toujours supérieure à la distance l du centre de gravité à l'axe de suspension et ne doit pas être confondue avec elle. Les pendules utilisés en horlogerie électrique n'ayant pas une forme géométrique simple (surtout ceux qui contiennent des aimants), le calcul ne peut être d'aucune utilité dans la détermination de la longueur du pendule simple synchrone, et l'on doit avoir recours à l'expérience.

2. Réglage de la période. — 1^o Par variation de longueur. —

Lorsque la durée d'oscillation d'un pendule n'est pas exactement celle que l'on désire, on peut y remédier en modifiant légèrement sa longueur ; pour fixer les idées, calculons de combien il faut allonger la tige d'un pendule simple pour obtenir un retard déterminé.

De la formule

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

on tire en différenciant :

$$\frac{dT}{T} = \frac{1}{2} \frac{dl}{l}.$$

Si l'on veut que le pendule retarde de 1 minute par jour

$$\left(\frac{dT}{T} = \frac{1}{60 \times 24} \right),$$

il faut donc que

$$\frac{dl}{l} = \frac{2}{60 \times 24} = \frac{1}{720},$$

ce qui pour un pendule battant la demi-seconde ($l = 25$ centimètres) donne $dl = 0$ mm. 35. Pour un retard de 1 seconde par jour, le raccourcissement devrait être encore 60 fois plus faible, c'est-à-dire de l'ordre de quelques μ seulement.

2^o Par déplacement d'une masselotte. — La petitesse de ces déplacements montre qu'il est pratiquement impossible de régler avec précision, par la méthode précédente, la durée d'oscillation d'un pendule. Aussi préfère-t-on généralement laisser invariable la longueur l et ajouter une petite masselotte m que l'on déplace sur la tige du pendule pour parfaire le réglage.

Supposons encore pour simplifier les calculs que toute la masse M est concentrée au point G. L'adjonction de la masse m à une distance x de l'axe de suspension augmente à la fois le moment d'inertie et le couple moteur. De

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{Ml^2}{Mgl}}$$

la période passe à :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{Ml^2 + mx^2}{Mgl + mgx}}$$

Étudions ses variations en fonction de x .

Pour $x = 0$ et pour $x = l$, elle est égale, ce qui était évident *a priori*, à T_0 . Entre $x = 0$ et $x = l$, elle passe par un minimum dont nous obtenons la valeur en annulant la dérivée de la quantité placée sous le radical, ce qui donne :

$$(Ml + mx)2mx - (Ml^2 + mx^2)m = 0$$

ou

$$mx^2 + 2Mlx - Ml^2 = 0.$$

Si m est très petit devant M , ce qui est le cas général, le terme en x^2 peut être négligé dans cette équation et c'est pour $x = \frac{l}{2}$ que la période est minima (fig. 2).

Quand le dénominateur de la fraction est nul, c'est-à-dire quand

$$x = -\frac{M}{m}l$$

(la masselotte est alors située au-dessus de l'axe de rotation comme dans le cas du métronome), T est infini.

Pour x très grand négatif, la période est imaginaire ; pour x très grand positif, elle croît comme \sqrt{x} .

On voit que l'influence de la masselotte dépend essentielle-

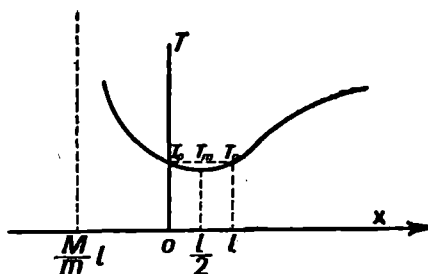


Fig. 2.

ment de sa position et qu'elle est sensiblement nulle lorsqu'elle se trouve dans la position moyenne ; pratiquement on s'arrangera pour la placer à l'extrémité inférieure du pendule.

Les limites entre lesquelles la surcharge m permet de faire varier la période s'évaluent facilement. La période minima T_m s'obtient en effet en remplaçant dans la valeur de T , x par $\frac{l}{2}$

$$T_m = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g} \left(1 - \frac{m}{4M}\right)}$$

d'où

$$\frac{T_0 - T_m}{T_0} = \frac{m}{2M}.$$

Ainsi, en déplaçant une surcharge de 1 gramme sur la tige d'un pendule pesant 1 kilogramme on peut arriver à diminuer sa période de $\frac{1}{2.000}$ de sa valeur (ce qui correspond à une avance de 43 secondes par jour).

3^o Enfin, signalons pour mémoire qu'on peut dans quelques cas particuliers terminer le réglage en agissant sur divers facteurs n'ayant qu'une importance secondaire, par exemple :

Variation de pression dans les pendules astronomiques dites « à pression constante ».

Variation de la tension d'alimentation ou déplacement d'une petite masse de fer doux au voisinage de l'aimant dans les pendules électriques à entretien direct (page 48).

II. — GRANDES AMPLITUDES

3. Calcul de la période. — Supposons maintenant que l'amplitude du mouvement est notable.

L'équation

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = -Mgl \sin \theta$$

s'intègre facilement une première fois :

$$I \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 = 2Mgl (\cos \theta - \cos \alpha).$$

On connaît donc immédiatement, quelque grande que soit l'amplitude, la vitesse du pendule pour une position quelconque.

Mais le calcul de la période T n'est pas aussi simple.

De l'équation précédente mise sous la forme

$$dt = \sqrt{\frac{I}{Mgl}} \cdot \frac{d\theta}{\sqrt{2(\cos \theta - \cos \alpha)}}$$

nous tirons

$$T = 4 \sqrt{\frac{I}{Mgl}} \int_0^\alpha \frac{d\theta}{\sqrt{2(\cos \theta - \cos \alpha)}}.$$

Changeons de variable. Posons

$$\sin \varphi = \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}};$$

la période devient

$$T = 4 \sqrt{\frac{I}{Mgl}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - \sin^2 \frac{\alpha}{2} \sin^2 \frac{\varphi}{2}}}.$$

Nous avons ainsi fait apparaître l'intégrale elliptique de première espèce dont les valeurs se trouvent calculées avec une

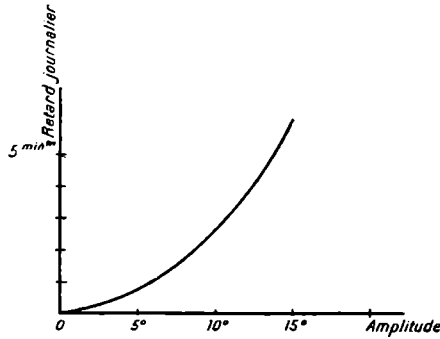


Fig. 3.

grande précision dans des tables spéciales. Utilisant celles-ci (1) nous pouvons maintenant dresser le tableau suivant (fig. 3) qui montre l'influence de l'amplitude sur la période.

(1) Au lieu de ces tables on peut aussi bien utiliser la formule équivalente :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{Mgl}} \left[1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 \sin^4 \frac{\alpha}{2} + \dots \right]$$

qui se réduit dans le cas de faibles amplitudes à :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{Mgl}} \left(1 + \frac{\alpha^2}{16} \right).$$

Amplitude en degrés	Valeur de l'intégrale	Période (la période correspondant à l'amplitude 1 étant prise comme unité)	Retard en minutes et en secondes par jour
0	1,5708	1	0 .
1	1,5708	1,000019	1 ^s ,65
2	1,5709	1,000076	6 ^s ,59
3	1,5711	1,000171	14 ^s ,8
4	1,5713	1,000304	26 ^s ,3
5	1,5716	1,000476	41 ^s ,1
6	1,5719	1,000685	59 ^s ,2
7	1,5723	1,000983	1 ^m 20 ^s
8	1,5727	1,00122	1 ^m 45 ^s
9	1,5732	1,00154	2 ^m 13 ^s
10	1,5738	1,00190	2 ^m 45 ^s
12	1,5751	1,00275	3 ^m 57 ^s
14	1,5767	1,00376	5 ^m 24 ^s
16	1,5785	1,00492	7 ^m 05 ^s
18	1,5805	1,00620	8 ^m 55 ^s
20	1,5828	1,00765	11 ^m

APPLICATION. — Assimilons provisoirement à un pendule libre le balancier d'une pendule d'observatoire et voyons avec quelle approximation il faut surveiller son amplitude pour que l'on soit sûr du $\frac{1}{100}$ de seconde (par jour).

La relation

$$T = T_0 \left(1 + \frac{x^2}{16} \right)$$

nous donne :

$$dT = T_0 \frac{\alpha dx}{8}.$$

Prenons $l = 1^m$, $T = 2$ sec., $x = \frac{1}{30}$ (deux degrés environ). Il vient :

$$dT = \frac{1}{100 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60} = 2 \cdot \frac{1}{30} \cdot \frac{dx}{8}$$

d'où

$$dx = 0,000013,$$

ce qui correspond pour l'extrémité inférieure du balancier à un déplacement linéaire de 13 millièmes de millimètre ; d'où nécessité d'employer un viseur à fort grossissement.

4. Correcteurs d'isochronisme. — Ainsi, pour un pendule uniquement soumis à l'action de la pesanteur, la période n'est pratiquement constante que si l'amplitude reste très faible (1).

Mais nous pouvons essayer d'améliorer cet isochronisme en faisant agir un couple supplémentaire convenable, dû par exemple à un ressort.

L'équation fondamentale du mouvement devient en effet, si nous développons le sinus en série :

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = -Mgl \left(\theta - \frac{\theta^3}{6} + \frac{\theta^5}{125} - \dots \right)$$

et nous voyons que les oscillations pourront rester pratiquement isochrones même pour des valeurs notables de l'amplitude si nous réussissons à faire disparaître le terme en θ^3 .

Il nous suffira pour cela de faire agir sur le pendule un ressort de rappel dont nous rendrons le couple proportionnel à θ^3 ; voici par exemple une réalisation possible :

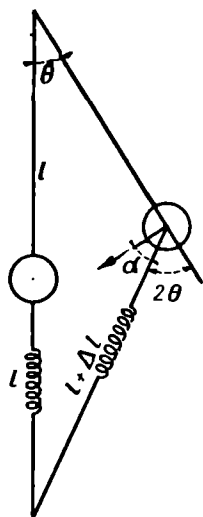


Fig. 4.

1° Ressort correcteur. — Soumettons le pendule à l'action d'un ressort disposé comme l'indique la figure 4, et supposons d'abord pour simplifier que celui-ci ait dans la position d'équilibre une tension nulle et la même longueur l que le pendule. Lorsque nous déplaçons légèrement ce pendule d'un angle θ , le

(1) Le pendule cycloïdal (point assujéti à se déplacer sur une cycloïde) est isochrone quelle que soit l'amplitude du mouvement, mais les applications de cette propriété à la chronométrie ont été depuis longtemps abandonnées.

ressort s'allonge d'une quantité Δl qu'il est facile de calculer si l'on se borne à sa partie principale ; on trouve $\Delta l = l\theta^2$.

L'attraction F exercée par le ressort sur le pendule est proportionnelle à son allongement relatif

$$F = k \frac{\Delta l}{l} = k\theta^2.$$

Cette force étant oblique à la trajectoire, seule sa composante tangentielle $F \cos \alpha$ a quelque influence sur le mouvement et comme en première approximation $\cos \alpha$ est égal à 2θ nous avons :

$$F \cos \alpha = 2k\theta^3.$$

Ainsi, nous avons obtenu une composante utile proportionnelle au cube de l'élongation. Elle fera disparaître de l'équation du mouvement le terme en θ^3 si l'élasticité du ressort a été choisie telle que

$$2k = \frac{Mg}{6},$$

c'est-à-dire s'il double de longueur sous l'action d'un poids 12 fois plus faible que celui du pendule.

Envisageons maintenant le cas où la tension initiale du ressort n'est plus nulle : nous disposons d'un nouveau paramètre qui va nous permettre de satisfaire à une condition supplémentaire, par exemple : obtention d'un isochronisme plus approché par disparition du terme en θ^5 ou encore compensation thermique. Dans les pendules Bulle Clock, on obtient ce dernier résultat en utilisant un ressort d'acier au nickel dont le module d'élasticité croît avec la température ; lorsque sous l'action d'un échauffement, la tige du balancier s'allonge provoquant un retard, l'augmentation de la raideur du ressort tend à produire une avance compensatrice.

On peut certainement imaginer d'autres dispositifs plus ou moins compliqués, mais l'expérience a montré qu'il ne fallait s'engager dans cette voie qu'avec beaucoup de prudence, les

réglages étant toujours très délicats. Nous tenons d'ailleurs à faire remarquer dès maintenant que l'isochronisme du pendule libre n'est en chronométrie qu'un problème secondaire, car cet isochronisme, à supposer qu'on puisse l'obtenir rigoureusement, serait immédiatement détruit par l'échappement (à moins que celui-ci ne soit spécialement étudié).

2° Butées élastiques. — On peut enfin améliorer l'isochronisme en disposant à une distance convenable du balancier (fig. 5) une

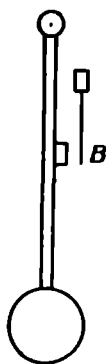


Fig. 5.

butée élastique B qui le repousse vers sa position d'équilibre dès que l'élongation dépasse une certaine valeur : ce dispositif ne saurait évidemment prétendre à réaliser un isochronisme aussi parfait que les précédents ; toutefois sa simplicité le rend très intéressant pour les pendulettes, un dérèglement accidentel même important ne pouvant en aucune manière influencer la durée des petites oscillations.

L'influence de ces butées élastiques a été complètement étudiée par le calcul (1) ; nous nous bornons, pour préciser la qualité de l'isochronisme qu'elles permettent d'obtenir, à citer un exemple numérique : dans un cas particulier, la butée entrant en action pour une élongation de 7° , le retard journalier R (en secondes par jour) est donné en fonction de l'amplitude α par le tableau suivant (en vue de faciliter la comparaison on a indiqué également les résultats relatifs au pendule libre) :

Amplitude α	7°	$7^\circ 30'$	8°	9°	10°	11°	12°
R (avec butée)	81	83	81	78	80	86	101
R (pendule libre) . . .	81	92	105	132	165	199	239

On voit qu'entre 7° et $10^\circ 30'$, la marche avec butée est tout à fait satisfaisante (fig. 6, courbe 2). Pour un ressort 1,4 fois plus fort (courbe 3) on aurait un minimum beaucoup plus accusé,

(1) HAAG, *Annales de chronométrie*.

presque nul, tandis que pour un ressort 1,25 fois plus faible (courbe 4) ce minimum aurait déjà disparu.

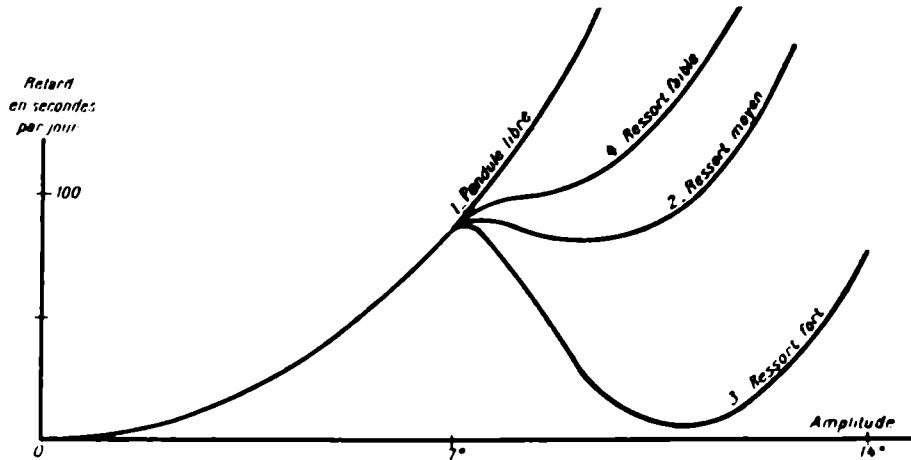


Fig. 6.

Signalons, pour terminer, un défaut commun à tous ces correcteurs : si la mise d'aplomb n'est pas parfaite, les variations de marche qui en résultent peuvent devenir très importantes.

III. — AMORTISSEMENT ET ENTRETIEN

5. Causes d'amortissement. — Le balancier d'une horloge, lorsqu'on néglige d'entretenir son mouvement, voit l'amplitude de ses oscillations décroître régulièrement et finit au bout d'un temps plus ou moins long par s'arrêter complètement. Parmi les causes de cet amortissement nous pouvons citer notamment : la suspension, la résistance de l'air, les courants de Foucault et enfin la commande des aiguilles.

1° Suspension. — Les suspensions ordinaires sont à ressort et la figure 7 montre la disposition généralement adoptée dans les horloges électriques : deux ressorts parallèles et situés dans le même plan sont serrés entre deux mâchoires, l'une fixée au support, l'autre reliée par un goujon à la chape du balancier : on

élimine ainsi tout gauchissement dans le cas d'un aplomb imparfait. La présence de cette suspension à ressort modifie évidemment, quoique d'une manière à peine sensible, les oscillations du balancier ; tandis que son élasticité diminue la période, le frottement interne du métal produit de l'amortissement, suivant une loi d'ailleurs assez peu connue.

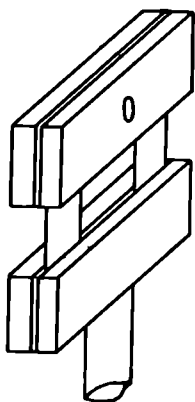


Fig. 7.

Dans certains cas (Bulle Clock) les ressorts sont remplacés par un ruban de soie tressé moins fragile (mais quelquefois hygrométrique).

Dans les pendulettes qui doivent fonctionner même avec un aplomb défectueux sans que l'aimant porté par le balancier vienne buter contre la bobine fixe, on adopte la suspension par pivots (Bulle Clock) ou par œillets (Ato) (fig. 8) ; le transport et l'installation sont ainsi rendus plus faciles, mais l'amortissement est fortement augmenté.

2^o Amortissement par l'air. — L'expérience montre que dans l'air la période des oscillations et l'amortissement sont plus grands que dans le vide ; il est aisé de voir pourquoi.

Dans l'air, le poids du balancier est plus petit que dans le vide (principe d'Archimède). D'autre part l'inertie du système oscillant n'a pas diminué ; au contraire, elle a même augmenté à cause de l'air entraîné par le balancier, d'où une augmentation de la période.

Le mouvement du balancier entraîne des pertes par convection (sensiblement proportionnelles à la pression) et par viscosité (indépendantes de la pression quand celle-ci n'est pas très réduite), d'où amortissement.

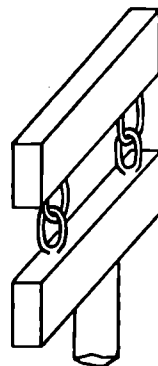


Fig. 8.

Les perturbations dues aux variations de la pression atmosphérique sont de l'ordre de 1/10 de seconde par jour et par cen-

timètre de mercure ; c'est négligeable pour les pendules ordinaires, mais cela explique pourquoi on préfère maintenir à pression constante (50 centimètres de mercure environ) les pendules de précision.

3^o Courants de Foucault. — Enfin dans toutes les pendules qui comportent un aimant se déplaçant dans une bobine (fig. 9) il apparaît des courants induits qui produisent un couple d'amor-

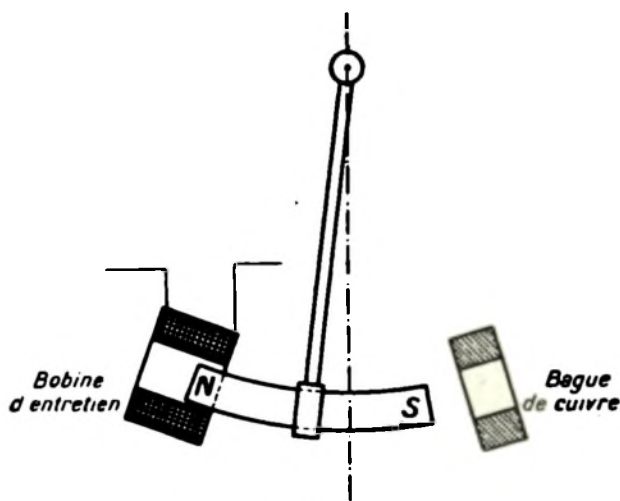


Fig. 9.

tissement proportionnel à la vitesse. Le plus souvent, pour diminuer l'importance de ces courants de Foucault, on fend longitudinalement par un trait de scie la carcasse métallique de la bobine. Mais on peut au contraire utiliser leurs propriétés amortissantes pour diminuer l'influence des variations du couple moteur sur l'amplitude des oscillations ; on dispose alors à une distance convenable de la position d'équilibre une bague en court-circuit dont l'effet ne se fait sentir que pour des amplitudes exagérées. Pour montrer l'importance de cet amortissement, voici un tableau donnant l'amplitude des oscillations pour une pendulette alimentée à tension variable et munie d'une bague de cuivre placée à différentes distances de l'aimant (les distances

sont comptées à partir de la position qu'occupe au repos l'extrémité correspondante de l'aimant).

Tension en volts	Sans bague	1 bague à 35 mm.	1 bague à 25 mm.	1 bague à 15 mm.
0,8	2°10	2°05	»	»
1	3°	2°50	»	»
1,25	3°55	3°35	2°05	»
1,5	4°55	4°05	2°30	»
1,75	5°40	4°30	2°45	2°10
2	»	4°50	3°05	2°20
3	»	5°30	3°55	2°55
4	»	»	4°30	3°10

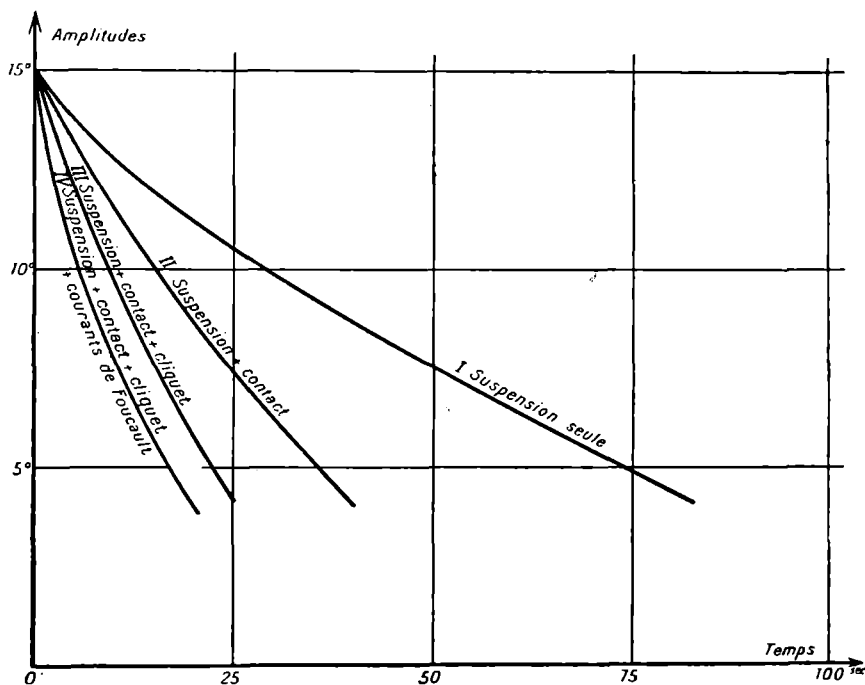


Fig. 10.

On voit par exemple qu'une bague placée à 30 ou 35 millimètres de distance n'a pas d'effet sensible pour de faibles tensions, mais qu'elle réduit nettement l'amplitude pour les tensions élevées.

4^o **Manœuvre des aiguilles.** — Enfin, dans bon nombre de pendules le balancier doit à chaque oscillation actionner les aiguilles, et manœuvrer un contact électrique ; il en résulte un amortissement plus ou moins élevé suivant le dispositif de commande, la dimension et la position des aiguilles, mais qui est rarement négligeable.

Pour fixer l'ordre de grandeur de toutes ces causes d'amortissement, nous avons étudié comment variait en fonction du temps et dans différentes conditions l'amplitude d'une pendulette Ato. La courbe 1 de la figure 10 est relative au balancier oscillant librement dans l'air ; pour les courbes 2, 3 et 4 interviennent en outre la manœuvre du contact, la manœuvre des aiguilles et les courants de Foucault.

6. Influence de l'amortissement sur la période. — 1^o **Cas général.** — Nous avons déjà calculé la période d'oscillation du pendule simple sans frottement. La question se pose maintenant de savoir si la formule obtenue est encore valable pour un balancier d'horloge soumis aux multiples causes d'amortissement que nous venons de signaler.

Il nous est malheureusement impossible d'attaquer de front ce problème cependant si important, car nous ne possédons sur ces différentes formes d'amortissement que des données physiques insuffisantes. Comment varient en fonction de la vitesse le frottement interne des ressorts de suspension ou la résistance de l'air ? suivant quelle loi se fait l'attaque du rochet qui entraîne les aiguilles ? Autant de questions auxquelles nous ne pouvons donner de réponses satisfaisantes et qui nous empêchent de mettre en équation le problème proposé.

Mais ce que nous pouvons faire, faute de mieux, c'est de nous donner *a priori* certaines lois d'amortissement particulièrement simples, de les introduire dans les équations du mouvement, de calculer l'influence correspondante sur la période et de voir dans quels cas elle n'est pas négligeable. Nous pouvons étudier ainsi, en particulier, l'action d'un frottement constant, d'un frottement proportionnel à la vitesse et d'un choc instantané ; natu-

rellement, pour ne pas compliquer les calculs nous nous bornons sauf indications contraires au cas de petites amplitudes.

2° **Frottement indépendant de la vitesse.** — En désignant par φ un angle proportionnel au frottement on peut mettre le couple de rappel sous la forme $C(\theta \pm \varphi)$, le double signe correspondant aux deux sens de marche. Le mouvement est donc le même que celui d'un pendule sans frottement dont l'axe de suspension serait déplacé en fin de course d'une quantité constante tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre : l'amplitude des oscillations décroît en progression arithmétique, la période n'est pas modifiée.

3° **Frottement proportionnel à la vitesse.** — L'équation du mouvement est :

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + f \frac{d\theta}{dt} + Mgl\theta = 0.$$

A condition que f soit suffisamment petit, l'intégrale est :

$$\theta = \theta_0 \cdot e^{-\lambda t} \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T},$$

en posant

$$\lambda = \frac{f}{2I} \quad \text{et} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{Mgl}} + \frac{\lambda^2}{8\pi^2}.$$

Nous en déduisons immédiatement que :

a) Les amplitudes successives décroissent comme les termes d'une progression géométrique.

b) Les oscillations sont encore isochrones ; la période est très sensiblement la même que sans amortissement.

Ainsi, prenons un pendule battant la demi-seconde et choisissons $\lambda = 0,01$, ce qui est une valeur assez importante, chaque amplitude ne valant que 99 p. 100 de la précédente. Le retard dû à l'amortissement a pour expression

$$\frac{(0,01)^2}{8\pi^2} = 0,0000013.$$

Il est absolument négligeable (0,1 seconde par jour).

REMARQUES : a) Les conclusions précédentes peuvent être étendues au cas où le coefficient f serait fonction de l'élongation θ ; c'est ainsi que l'amortissement produit en fin de course par des courants de Foucault (page 15) ne modifie pas sensiblement la période.

b) Dans le cas de petites oscillations un frottement proportionnel à la vitesse n'a sur la période aucune influence sensible. Mais il en serait autrement, *quoique d'une manière indirecte*, pour de grandes oscillations, la période diminuant en même temps que l'amplitude suivant le tableau de la page 9.

4° **Amortissement par choc.** — Supposons enfin que de l'énergie soit empruntée au pendule, non plus progressivement pendant toute la durée de l'oscillation, comme dans les cas précédents, mais brusquement, pour une élongation déterminée (le pendule devra par exemple actionner un cliquet ou déclencher un contact). Qu'en résultera-t-il pour la période ?

Il est d'abord évident que si le choc a lieu au moment du passage par la verticale, la période n'en sera pas affectée ; il y aura bien diminution brusque de vitesse et diminution d'amplitude pour l'oscillation suivante, mais nous savons que le temps qui sépare deux passages consécutifs par la verticale est indépendant de l'amplitude.

Il n'en sera plus de même si le choc se produit en dehors de la verticale, un peu avant pour fixer les idées. L'oscillation qui devait se terminer avec une certaine vitesse se terminera plus lentement ; la période sera augmentée, le retard étant d'autant plus important que le choc a lieu plus loin de la verticale. Les conclusions seraient évidemment inversées si la diminution brusque de vitesse avait lieu après le passage de la verticale.

Précisons l'ordre de grandeur. Reprenons le pendule précédent battant la demi-seconde ; dans l'hypothèse d'un frottement proportionnel à la vitesse nous avons adopté la valeur $\lambda = 0,01$ ce qui signifiait que d'une oscillation à la suivante, l'amplitude diminuait de 1 p. 100. Obtenons cette fois le même amortissement en donnant au pendule un petit choc juste suffisant pour l'arrêter

lorsque son élongation atteint 99 p. 100 de l'amplitude normale et comparons les variations correspondantes de la période.

L'équation du mouvement avant l'impulsion est :

$$\theta = \alpha \sin 2\pi \frac{t}{T}.$$

Nous produisons le choc qui annule la vitesse au moment où

$$\frac{\theta}{\alpha} = 0,99,$$

c'est-à-dire au temps

$$t = \frac{1}{2\pi} \arcsin 0,99 = 0^s,227,$$

alors que, sans choc, la vitesse ne se serait annulée qu'au temps 0^s,25. Ce choc a donc produit une avance de

$$0,250 - 0,227 = 0,023$$

seconde par période, soit de 33 minutes par jour (1).

On voit que les chocs même très faibles peuvent avoir sur la période une influence considérable s'ils se produisent loin de la verticale. Vis-à-vis des perturbations qu'ils apportent, nous avons parfaitement le droit de négliger celles qui sont dues aux frottements.

REMARQUES. — *a)* La durée d'oscillation n'est pas sensiblement modifiée lorsqu'il se produit à chaque période deux chocs dont les effets se détruisent, par exemple lorsqu'à chaque demi-oscillation le pendule reçoit en deux points symétriques par rapport à la verticale deux percussions égales et de même sens.

b) Nous avons dit que des courants de Foucault produits en fin

(1) Nous avons choisi un cas particulièrement simple pour éviter de longs calculs, mais on sait calculer la perturbation de marche pour un choc se produisant dans n'importe quelle position.

de course ne modifiaient pas sensiblement la période, et pourtant, comme ils peuvent agir brutalement, on pourrait être tenté de les assimiler à un choc. Il n'y a pourtant pas là contradiction car si ces courants accélèrent une demi-oscillation ils ralentissent la suivante et il y a compensation ; on ne peut pas les assimiler à une butée élastique, car celle-ci restitue finalement au pendule l'énergie qu'elle lui a empruntée tandis que les courants de Foucault absorbent toujours de l'énergie, tant à l'aller qu'au retour.

7. Entretien des oscillations. — Pour maintenir invariable l'amplitude des oscillations d'un pendule amorti, il est nécessaire de lui fournir à chaque période une quantité d'énergie égale à celle qui est dissipée par l'amortissement. Dans les horloges, cet apport d'énergie est discontinu, l'entretien étant obtenu par petites impulsions motrices périodiques reçues par le pendule lorsqu'il passe dans le voisinage de sa position d'équilibre.

De ce que nous avons déjà dit sur les chocs retardateurs, on déduit immédiatement l'influence qu'ont sur la période ces impulsions motrices : *toute impulsion qui se produit avant le passage par la verticale diminue la période* ; celle-ci est au contraire augmentée si l'impulsion a lieu après la verticale. Cet effet perturbateur dû à l'entretien, comme d'ailleurs celui qui provient de l'exagération des amplitudes, *n'aurait aucune importance s'il était constant* ; il suffirait de modifier en conséquence le réglage de l'horloge pour qu'elle continuât à marquer l'heure exacte. Malheureusement il ne peut en être ainsi d'une manière rigoureuse et l'expérience montre que ces perturbations présentent des variations plus ou moins importantes contre lesquelles on doit prendre quelques précautions.

Variations lentes dues en particulier à l'usure des pièces frottantes, à l'affaiblissement des piles ou à l'épaississement des huiles. Pour réduire l'effet perturbateur dû à l'entretien, le meilleur moyen est encore de diminuer l'impulsion elle-même ou ce qui revient au même l'amortissement. Conclusion : une bonne pendule doit être un mécanisme de précision, d'une réalisation

extrêmement soignée et d'une consommation aussi réduite que possible.

Variations rapides dues à des irrégularités périodiques ou non du couple moteur et du couple résistant (trains d'engrenages défectueux, dissymétrie de la roue d'échappement, mauvais contacts électriques). On y remédie partiellement en donnant au balancier, une « puissance réglante », c'est-à-dire une réserve d'énergie importante. L'expression $W = \frac{1}{2} Mgl \alpha^2$ de l'énergie emmagasinée par un pendule montre qu'à ce point de vue on aurait tout intérêt à employer des balanciers longs et lourds et à utiliser de grandes amplitudes. Pratiquement, dans les garde-temps d'observatoire, pour rester dans la limite des petites oscillations, on ne donne des valeurs importantes qu'à M et à l ; au contraire, dans les pendulettes dont les dimensions d'encombrement sont limitées, on est forcé de donner à α des valeurs élevées, ce qui conduit parfois à adopter des correcteurs d'isochronisme.

IV. — MESURE DE LA PÉRIODE

Nous avons déjà vu comment on pouvait calculer la durée d'oscillation d'un pendule ; indiquons maintenant comment on peut la mesurer.

8. Méthode des passages. — Cette méthode peut être employée dans tous les cas, quel que soit l'ordre de grandeur de la période à mesurer et quel que soit l'instrument de comparaison (pendule astronomique, chronomètre). On fait osciller le pendule à étudier et on note le temps t qu'il met pour faire p oscillations. La période est

$$T = \frac{t}{p}.$$

1° *L'erreur commise sur T a pour valeur maxima*

$$dT = \frac{dt}{p},$$

en admettant qu'on ne s'est pas trompé grossièrement sur le nombre d'oscillations et en appelant dt la somme des erreurs maxima que l'on peut commettre sur le temps au moment du départ et de l'arrêt du chronomètre. Ainsi si $dt = 0,2$ seconde il faut pour avoir une erreur inférieure à 1 seconde par jour compter les oscillations pendant $\frac{1}{5}$ de jour soit pendant près de 5 heures.

2^o Pour faciliter la mesure tout en conservant la même approximation, on peut se dispenser de compter effectivement un nombre trop élevé d'oscillations en opérant de la manière suivante :

On compte d'abord les p premières oscillations et on note le temps t correspondant.

On laisse alors osciller le pendule sans compter ses oscillations. puis au voisinage du temps $2t$ on vient de nouveau l'observer ; on constate qu'entre les époques $2(t - dt)$ et $2(t + dt)$, la quantité dt étant encore de l'ordre de 0,2 seconde, il se produit un passage par la position d'équilibre ; c'est évidemment le $2p^{\text{ième}}$; on note le temps t' correspondant.

On recommence enfin à observer le pendule aux environs du temps $2t'$ et on constate qu'entre les époques $2(t' - dt)$ et $2(t' + dt)$ le pendule passe pour la $4p^{\text{ième}}$ fois par sa position d'équilibre ; on note aussi soigneusement que possible l'époque correspondante t'' ; on obtient de même t''' , etc.

Finalement, la période est donnée par les formules :

$$T = \frac{t''}{4p} \quad \text{ou} \quad \frac{t'''}{8p} \dots \text{etc.},$$

l'approximation étant la même que si l'on avait effectivement compté les $4p$ ou $8p$ oscillations, t'' ou t''' étant toujours connues avec une erreur inférieure à dt .

Cette manière de procéder n'est évidemment applicable que si dt est notablement plus petit que T , sans quoi on pourrait commettre une erreur grossière en confondant la $2p^{\text{ième}}$ et la $(2p + 1)^{\text{ième}}$ oscillation.

9. Méthode des coïncidences. — Cette méthode est utilisée lorsque le pendule à étudier bat à peu près la seconde. Elle consiste à comparer directement aux oscillations du balancier d'une horloge astronomique celles du pendule étudié que nous supposons pour fixer les idées un peu plus rapides.

1^o Principe. — Mesurons le temps t qui sépare deux coïncidences successives (passage simultané et dans le même sens par la position d'équilibre).

Pendant ce temps t le pendule de l'horloge a fait t oscillations simples, et le pendule étudié $t + 2$. La durée d'un battement est donc pour celui-ci :

$$T = \frac{t + 2}{t} = 1 + \frac{2}{t}.$$

Précisons l'approximation obtenue. L'erreur relative commise sur T , en admettant que l'horloge de comparaison soit parfaite est :

$$\frac{dT}{T} = 2 \frac{dt}{t^2}.$$

Or, si du point de vue mathématique il n'y a aucune raison pour que les deux pendules passent rigoureusement ensemble par leurs positions d'équilibre, en fait, du point de vue physique, lorsque les périodes sont très voisines, ils paraissent coïncider pendant plusieurs oscillations, de sorte que dt pourra être de quelques secondes. L'erreur sur T n'en sera pas moins très faible, à cause de la présence du terme t^2 .

Par exemple, si $t = 1.000$ et si l'on hésite entre 5 oscillations, soit 10 secondes pour chaque coïncidence, la valeur de dt pour l'intervalle qui sépare 2 coïncidences sera au plus égale à 20, de sorte que $\frac{dT}{T}$ sera inférieur à $\frac{40}{1.000.000}$ soit sensiblement 5 secondes par jour.

Pour avoir une approximation 2, 3..., n fois supérieure, il suffira d'attendre la 2^e, 3^e, n ^e coïncidence, ce qui ne demandera pas

un temps excessif, mais il ne faut cependant pas exagérer le nombre de ces coïncidences, car on ne doit pas oublier que la marche de l'horloge de comparaison n'est connue qu'avec une précision limitée. En fait, aujourd'hui que l'on a porté à un haut degré de perfection les méthodes d'observation des coïncidences, la précision qu'elles apportent est le plus souvent surabondante et la connaissance de la période d'oscillation d'une horloge est généralement limitée par la précision des observations astronomiques.

Passons maintenant en revue les différents procédés d'observation en insistant sur la netteté avec laquelle ils permettent d'apprécier les coïncidences successives, c'est-à-dire sur l'approximation qu'ils sont susceptibles de fournir.

2° Observation optique. — Le passage simultané des deux pendules par la verticale peut être observé directement au moyen d'un viseur. Mais ce dispositif qui convient surtout aux recherches de laboratoire est rarement appliqué dans les installations industrielles, la disposition des pendules et les faibles dimensions de leur cage se prêtant difficilement à l'installation de montages optiques compliqués.

3° Battements naturels écoutés directement. — Pour comparer la marche de deux horloges, il suffit d'écouter directement leur tic-tac naturel, mais ces bruits, ces battements présentent un grave défaut : par suite de la sonorité de la cage leur durée n'est pas négligeable ; en outre, dans le cas d'horloges à échappement mécanique qui donnent un battement à chaque oscillation simple, il y a toujours une certaine dissymétrie entre deux battements successifs, un « boîtement » que l'on n'arrive jamais à supprimer complètement et qui oblige à faire abstraction d'un battement sur deux, celui qui correspond aux secondes paires par exemple ; il en résulte que les coïncidences paraissent plus floues et en fait, par ce procédé, il est difficile d'atteindre le 1/100 de seconde.

On peut améliorer notablement ces battements naturels en les

écoutant non plus directement mais dans un écouteur téléphonique : le son obtenu est plus bref, il peut avoir la même intensité pour les deux pendules à étudier, et enfin, il devient possible de comparer des pendules situés dans des salles différentes.

Un microphone est placé à cet effet sur le mouvement de chaque horloge, à l'intérieur de la cage ; il est disposé en série avec une pile, un rhéostat de réglage et le primaire d'une petite bobine d'induction ; le casque téléphonique est en série avec les secondaires de ces deux bobines.

4° Battements artificiels commandés par un contact électrique.

— La plupart des pendules sont munies d'un contact qui sert soit à leur entretien, soit à la synchronisation d'autres horloges, soit encore à la commande de cadrans compteurs de secondes ou de chronographes enregistreurs ; on peut utiliser ce contact pour produire des battements artificiels au moment de l'ouverture ou de la fermeture d'un circuit auxiliaire comprenant une pile et un écouteur téléphonique.

En utilisant à la fois la fermeture et l'ouverture du circuit on obtiendrait à chaque période dans le téléphone deux bruits plus ou moins décalés dont un seul serait utile, ce qui serait fort gênant pour l'observation des coïncidences. Aussi ajoute-t-on un dispositif électrique supprimant soit le bruit d'ouverture, soit celui de fermeture, par exemple :

Un condensateur shunté par une résistance élevée (fig. 11) est placé en série avec le téléphone ; à la fermeture le condensateur se charge à travers le téléphone qui fait entendre un claquement sec ; à la rupture, le condensateur se décharge lentement dans la résistance qui le shunte.

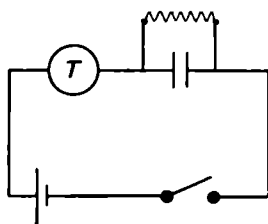


Fig. 11.

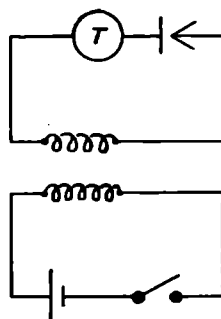


Fig. 12.

Un redresseur à oxyde de cuivre (fig. 12) dans le secondaire de la bobine d'induction qui actionne le téléphone ; un seul des courants peut passer, par exemple celui de rupture.

Les battements artificiels ainsi obtenus sont très brefs et peuvent être rendus parfaitement identiques pour des horloges différentes. Les coïncidences sont très faciles à observer à la condition toutefois que les périodes soient suffisamment voisines pour qu'il y ait sensiblement coïncidence lorsque les battements se rattrapent. Avec une différence de période de $1/1.000^e$ de seconde, il n'y a pas la moindre hésitation sur le battement de coïncidence.

5° **Battements artificiels obtenus sans contact matériel.** — Enfin pour aller plus loin encore il faut obtenir des battements artificiels sans contact matériel.

a) On peut munir chaque pendule d'un miroir (fig. 13) de manière à éclairer à chaque oscillation et pendant un temps très court une fente étroite placée devant une cellule photoélectrique. Les courants produits, amplifiés par des triodes, permettent d'inscrire sur une bande enfumée qui se déroule régulièrement le passage des pendules par la verticale.

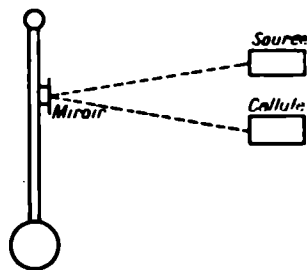


Fig. 13.

Un dispositif analogue au précédent est utilisé à l'observatoire de Paris pour la radiodiffusion des signaux horaires de coïncidences ; pour que ceux-ci soient rigoureusement équidistants le pendule qui agit sur la cellule est absolument libre pendant les cinq minutes que dure l'émission ; le reste du temps il est synchronisé par une pendule astronomique.

b) On peut enfin utiliser les pendules pour coupler deux circuits haute fréquence : on fixe à l'extrémité de chaque pendule une pièce isolante dans laquelle sont encastrés un fil et une plaque reliés entre eux (fig. 14). Immédiatement au-dessous sont dis-

posés un fil et une plaque semblables reliés respectivement à un émetteur radioélectrique oscillant sur une longueur d'onde quelconque (100 mètres par exemple) et à un récepteur apériodique. A chaque oscillation le pendule établit une liaison par capacité entre l'émetteur et le récepteur ; celui-ci reçoit un choc qui peut être très court, si les fils sont suffisamment fins ($1/10$ millimètre).

On peut avoir facilement 10 milliampères de variation pour le courant de plaque du troisième étage d'un amplificateur, ce qui est plus que suffisant pour obtenir de très bons enregistrements.

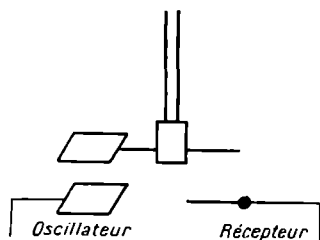


Fig. 14.

Ce dispositif peut fonctionner sans surveillance pendant des journées entières, les variations de longueur d'onde de l'émetteur n'ayant aucune influence sur le récepteur.

c) L'adjonction d'une lampe bigrille aux dispositifs précédents permet d'obtenir avec une extrême précision l'instant de la coïncidence.

Supposons qu'on fasse agir les deux pendules à comparer sur les deux grilles d'une lampe bigrille (1) de telle sorte qu'ils rendent ces grilles positives au moment de leur passage par la verticale ; on ne notera de courant plaque qu'au moment précis de la coïncidence des pendules et le simple examen du milliampèremètre de plaque donnera l'instant de cette coïncidence avec une très grande précision si les actions des pendules sur les grilles ne durent qu'un temps très court et si les pendules ne se décalent l'un par rapport à l'autre que d'une très petite fraction de seconde à chaque battement. On peut, avec ce dispositif radioélectrique, faire sans difficulté des comparaisons dont la précision est de l'ordre du dix-millième de seconde.

Il est évidemment bien entendu que les pendules comparés

(1) Dans une lampe bigrille, le courant plaque est sensiblement nul si l'une des deux grilles est négative.

ont une marche suffisamment constante pour que l'approximation donnée par ce procédé ne soit pas illusoire.

6° Pour étudier la marche d'une pendule astronomique, on prend en général comme point de comparaison les *signaux horaires* de la Tour Eiffel. Ceux-ci sont émis tous les jours à 9 h. 26 et à 22 h. 26 (T. M. G.) sur la longueur d'onde de 2 650 mètres et contiennent en particulier :

a) Une série de 6 points espacés l'un de l'autre de 1 seconde, dont le premier débute à 9 h. 27 m. 55 s. et le dernier à 9 h. 28 m. 00. En observant la position de ces points par rapport aux battements de la pendule, on détermine immédiatement la marche de celle-ci à une demi-seconde près.

Deux autres séries de 6 points commençant respectivement à 9 h. 28 m. 55 s. et à 9 h. 29 m. 55 s. permettent de contrôler l'observation précédente.

b) Une série de 61 signaux débutant à 9 h. 31 m. 00 et espacés de $60/61$ de seconde ; en observant avec lequel de ces signaux coïncide un battement de la pendule on peut déterminer la marche de celle-ci au $1/100$ de seconde.

Quatre autres séries de signaux analogues aux précédents, mais commençant respectivement à 9 h. 32 m. 00, 9 m. 33 m. 00, 9 h. 34 m. 00, 9 h. 35 m. 00, permettent de recommencer plusieurs fois la détermination de la marche par cette méthode de coïncidences.

10. Détermination de la période par la mesure d'une variation de phase. — Lorsque la période des deux pendules est extrêmement voisine, l'intervalle qui sépare deux coïncidences est très grand, si grand que les oscillations du pendule à étudier peuvent être amorties avant qu'on ait pu mesurer cet intervalle ou encore que l'on n'est plus suffisamment sûr de la régularité des pendules.

Il faut alors opérer plus rapidement que dans la méthode précédente en mesurant non plus le nombre de coïncidences mais la variation de la différence de phase pendant un temps déterminé.

Le problème est particulièrement aisé à résoudre lorsque les

horloges sont munies de contacts électriques, car on peut facilement enregistrer leurs oscillations au moyen d'électro-aimants inscripteurs. Supposons pour préciser que les deux pendules soient munis de contacts fournissant une émission de courant au moment où ils passent par la verticale ; en mettant ces contacts en parallèle dans un circuit comprenant une pile et un électro-aimant on peut obtenir sur une bande de papier enfumé l'inscription du passage par la verticale de ces deux pendules. Si sur cette bande la période d'une pendule astronomique (2 secondes) correspond à une longueur L , si au début les tops des deux pendules sont distants de l et si au bout de t secondes, ils ne sont plus distants que de l' c'est que la différence des périodes est :

$$2 \frac{l-l'}{L} t.$$

Un montage particulièrement intéressant est le suivant : A chaque contact le pendule à étudier charge négativement la grille d'une triode, supprimant ainsi tout courant plaque ; à chaque contact, le pendule étalon ramène cette grille au potentiel zéro et rétablit le courant. Le courant moyen dans le circuit plaque étant proportionnel à la différence de phase entre les deux pendules, un milliampèremètre enregistreur très fortement amorti permettra de suivre pas à pas la marche de la pendule à étudier et d'en mettre en évidence les irrégularités.

V. — INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE

11. Balancier monométallique. — Les variations de température modifient la période d'oscillation d'un pendule.

Nous savons, en effet, qu'un échauffement de t degrés entraîne pour un métal dont le coefficient de dilatation linéaire est α un allongement relatif donné par la formule

$$\frac{dl}{l} = \alpha t.$$

Différentions la formule $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ qui donne la durée d'oscillation d'un pendule simple ; nous obtenons pour celle-ci une augmentation relative égale à

$$\frac{dT}{T} = \frac{1}{2} \frac{dl}{l} = \frac{1}{2} \alpha t,$$

résultat qui est d'ailleurs valable sans restrictions pour un pendule de forme quelconque pourvu qu'il soit monométallique.

Appliquons par exemple la relation précédente à un pendule d'acier :

$$\alpha = 11 \cdot 10^{-6},$$

d'où

$$\frac{dT}{T} = \frac{1}{2} \cdot 11 \cdot 10^{-6} t.$$

Ainsi, pour un échauffement de 10° la période augmente de 55 millionnièmes de sa valeur, soit de 5 secondes par jour environ ; c'est inacceptable pour une horloge quelque peu précise.

Pour diminuer l'influence perturbatrice de la température, on est donc conduit à choisir des matières dont le coefficient de dilatation soit particulièrement faible. Les métaux usuels ne peuvent convenir ($\alpha = 17 \cdot 10^{-6}$ pour le cuivre, $29 \cdot 10^{-6}$ pour le zinc...). Aussi employait-on autrefois des tiges de sapin (étuvé et verni pour le rendre insensible à l'humidité) ; aujourd'hui, sauf lorsque le prix en est prohibitif, on adopte l'invar, acier à 36 p. 100 de nickel dont le coefficient de dilatation est de $1 \cdot 10^{-6}$ seulement.

12. Balancier bimétallique. — Mais si l'utilisation de l'invar permet de réduire l'action de la température, elle ne peut l'annuler complètement. La réalisation d'une compensation intégrale exige donc des dispositifs plus compliqués, par exemple l'emploi de balanciers bimétalliques ; montrons qu'effectivement ceux-ci peuvent être rendus insensibles aux variations de température.

Constituons un pendule en reliant par leurs extrémités inférieures (fig. 15) une tige et une lentille respectivement formées de deux métaux différents ; pour que la compensation soit parfaite, il faut et il suffit que la quantité

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{C}}$$

soit indépendante de la température.

La mise en équation de cette propriété ne présente aucune difficulté, mais elle nous conduirait dans le cas général à une relation inutilement compliquée. Pour simplifier les calculs, supposons que la tige a une masse négligeable et que la lentille est de faible rayon ; dans ces conditions, il nous suffira d'écrire (en négligeant les variations du moment d'inertie de la lentille autour de son centre) que la position du centre de gravité reste invariable.

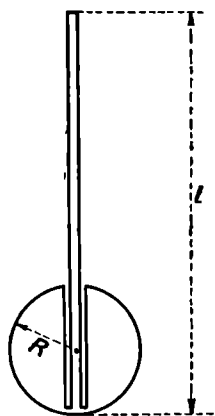


Fig. 15.

La distance du centre de gravité de la lentille à l'axe de rotation étant primitivement égale à

$$l - R$$

aura varié après un échauffement de t° de $(l\alpha - R\beta)t$, α et β étant respectivement les coefficients de dilatation de la tige et de la lentille ; pour que la période ne change pas, il suffit que cette quantité soit nulle, c'est-à-dire que :

$$\frac{R}{l} = \frac{\alpha}{\beta}.$$

L'hypothèse simplificatrice faite au début (R petit vis-à-vis de l) n'est acceptable que si nous pouvons trouver deux corps ayant des coefficients de dilatation bien différents. Or, c'est

parfaitement possible, comme en témoigne le tableau suivant :

Invar	1.10^{-4}
Fer	11.10^{-4}
Laiton	19.10^{-4}
Zinc	29.10^{-4}
Mercure (à section constante)	182.10^{-4}

Nous choisirons par exemple une tige d'invar et une lentille de laiton ou bien une tige de fer munie d'un récipient cylindrique rempli de mercure (1).

Par suite de l'incertitude qui règne sur les valeurs des coefficients de dilatation, la compensation ne peut être pratiquement réalisée qu'après de nombreuses retouches ; celles-ci sont d'autant plus pénibles que toute modification apportée à la répartition des masses agit aussi bien sur la période que sur la compensation. Pour faciliter ces deux réglages dans le cas de balanciers à lentille on peut munir ceux-ci du dispositif à double filetage indiqué sur la figure 16 et qui permet de modifier le point d'attache de la lentille sans modifier sensiblement la position du centre de gravité. Dans les balanciers à mercure, le réglage de la compensation s'effectue en modifiant la quantité de liquide contenue dans le récipient.

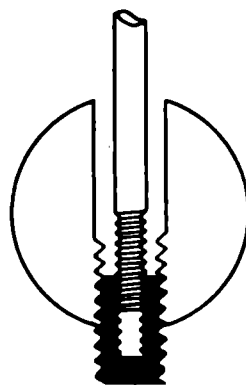


Fig. 16.

REMARQUES. — Ainsi, le problème de la compensation peut être considéré comme pratiquement résolu. Toutefois deux remarques s'imposent :

1^o L'emploi de l'invar a fait faire à la chronométrie de grands

(1) On a construit des compensateurs utilisant les couples fer-laiton ou fer-zinc, mais leur forme était plus compliquée (balanciers à grill) et leur fonctionnement défectueux.

progrès, et c'est grâce à lui que la compensation a pu être réalisée pour les pendules courantes. Il ne faut pourtant pas perdre de vue que les propriétés de cet alliage dépendent beaucoup des traitements thermiques qu'il a subis et qu'elles n'acquièrent une stabilité suffisante qu'au bout d'un certain temps. Par exemple, une tige d'invar de 1 mètre de long chauffée à 150° puis refroidie lentement s'est, après son retour à la température ordinaire, allongée de 5 μ . pendant les 250 premiers jours, de 5 μ . pendant les 1 000 jours suivants et ensuite de 4 μ . pendant les 2 300 jours suivants. Avant d'entreprendre le réglage d'une pendule de haute précision, il conviendra donc d'attendre un certain temps.

2° L'action de la température ne se limite pas à une dilatation des métaux ; ses effets se font sentir également sur la viscosité des huiles, l'élasticité des ressorts de suspension, etc...

D'autre part, nos raisonnements précédents supposaient que la température variait lentement, sans à-coups et qu'elle était uniforme dans toute la cage de la pendule (1).

Aussi la compensation n'est-elle pratiquement jamais réalisée d'une manière parfaite, et il est bien préférable, lorsqu'on le peut, de maintenir la pendule à température constante. C'est ainsi, par exemple, que dans les observatoires les garde-temps sont conservés au fond de caves profondes dans lesquelles les variations de température sont insensibles et ne sont observés qu'à distance par des procédés électriques.

(1) On a trouvé par exemple des différences de l'ordre de 1° entre la partie supérieure et la partie inférieure d'une horloge ; dans certains compensateurs à mercure (à récipient de verre) il faut attendre plusieurs jours avant que le liquide prenne pratiquement la température ambiante.

CHAPITRE II

HORLOGES A BALANCIER PENDULAIRE

I. — HORLOGES A REMONTAGE

13. Principe. — La manière la plus simple d'introduire l'électricité en horlogerie est certainement de l'utiliser au remontage d'une horloge mécanique (1). En ce qui concerne les mécanismes à balancier pendulaire, cette solution est à l'heure actuelle très en faveur pour les horloges monumentales (2) et pour les horloges astronomiques parce qu'elle conduit dans le premier cas à un matériel robuste et pratique, dans le second cas à une précision remarquable.

Prenons une de ces horloges, une horloge astronomique par exemple et examinons-en les organes ; elle comprend, en principe :

Un balancier pendulaire battant la seconde.

Un poids moteur remonté périodiquement au moyen de l'électricité et qui tend à faire tourner d'un mouvement continu les aiguilles.

Un échappement qui, sous le contrôle du balancier, distribue l'énergie fournie par la chute du poids, partie pour faire avancer

(1) La première pendule à remontage électrique date de 1856 (Bréguet).

(2) Pour mettre en évidence les avantages que ces horloges tirent de l'électrification, précisons que l'équipement de l'horloge de la cathédrale de Messine (Ungerer) a nécessité l'installation de 10 moteurs électriques. Il est vrai qu'elle a une hauteur totale de 30 mètres et ne comporte pas moins de 50 automates ; le fonctionnement de la sirène qui produit le rugissement du lion absorbe à lui seul 3 chevaux.

d'une manière discontinue les aiguilles, partie pour entretenir les oscillations de ce balancier.

Nous avons déjà parlé du balancier ; avant de passer à l'échappement, occupons-nous du système de remontage. Et tout d'abord, quelle source de courant et quelle sorte de moteur allons-nous employer ?

Dans une horloge mécanique ordinaire, remontée une fois par semaine, l'énergie est transmise du poids à la roue d'échappement par l'intermédiaire de trains d'engrenages. Malheureusement ceux-ci sont loin d'être parfaits surtout lorsque l'usure a modifié un peu le profil des dents, de sorte que le couple d'entretien est assez variable et la marche de la pendule irrégulière.

Pour une horloge astronomique, nous ne pouvons pas tolérer ces variations de couple moteur. Supprimons donc les engrenages ; mais alors nous serons obligés d'utiliser un poids beaucoup plus léger et de le remonter plus souvent, chaque minute par exemple. Conséquence : comme nous ne pouvons compter que sur une réserve de marche insignifiante, il nous est impossible d'utiliser le secteur toujours susceptible de pannes et nous devons nous adresser à une batterie de piles ; sous une tension aussi faible le seul moteur électrique pratiquement utilisable est l'électro-aimant.

Nous aurons donc recours à des électro-aimants ; pour pouvoir les utiliser dans les meilleures conditions de rendement nous commencerons par en calculer la force attractive.

14. Force attractive d'un électro-aimant. — 1^o Formule générale. — Maintenons dans un électro-aimant de n spires un courant constant i et laissons-le attirer son armature. Lorsque celle-ci se déplace de dx le flux augmente de $d\varphi$ et l'énergie électromagnétique $ni d\varphi$ fournie au système se divise en deux parties égales, l'une qui sert à augmenter l'énergie d'aimantation du système (1), l'autre qui se transforme en travail mécanique $d\mathcal{E}$.

(1) Cette énergie d'aimantation se transforme en chaleur dans l'étincelle de rupture. Comme l'effet Joule dissipe lui aussi une partie de l'énergie

Désignant par F la force attractive, nous avons donc :

$$d\mathcal{E} = F dx = \frac{1}{2} ni d\varphi,$$

d'où

$$F = \frac{1}{2} ni \frac{d\varphi}{dx}.$$

Désignons par \mathcal{X} la perméance du circuit magnétique (inverse de la réluctance), définie par la formule

$$\varphi = 4\pi ni \mathcal{X}$$

et éliminons le flux entre cette équation et la précédente ; nous obtenons :

$$F = 2\pi (ni)^2 \frac{d\mathcal{X}}{dx}.$$

Par un raisonnement analogue, nous aurions obtenu pour un mouvement de rotation de l'armature un couple égal à

$$C = 2\pi (ni)^2 \frac{d\mathcal{X}}{d\alpha}.$$

Tant que le fer n'est pas saturé, la perméance est une fonction bien définie des dimensions géométriques du circuit magnétique ; on peut donc calculer facilement pour n'importe quelle position de l'armature la force attractive correspondante. Précisons par des exemples.

2^o Electro à fer à cheval. — Négligeons pour simplifier, en première analyse, la réluctance du fer vis-à-vis de celle de l'air, ce qui est pratiquement légitime dès que l'entrefer atteint quelques dixièmes de millimètre et examinons comment varie la

électrique on voit que le rendement est toujours nettement inférieur à 50 p. 100.

force attractive en fonction de la distance pour un électro-aimant en fer à cheval du type normal (fig. 17).

En négligeant les fuites magnétiques, la perméance de l'air a pour valeur $\mathcal{R} = \frac{S}{2x}$, S représentant la section du noyau et x la

longueur de l'entrefer ; d'où

$$F = \pi (ni)^2 \frac{S}{x^2}.$$

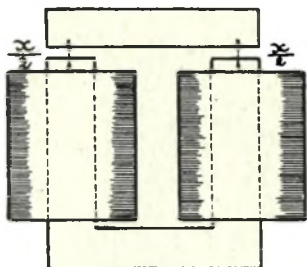


Fig. 17.

La force varie en raison inverse du carré de la distance ; elle est très faible au moment du démarrage, ce qui est une très mauvaise disposition.

La courbe I de la figure 20 relative à un électro Morse (intensité : 40 milliampères) confirme ces résultats théoriques.

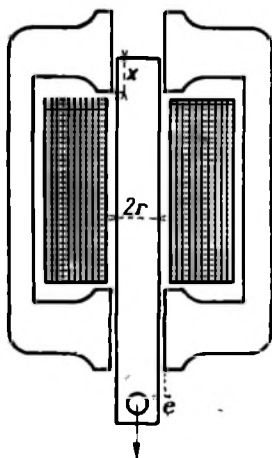


Fig. 18.

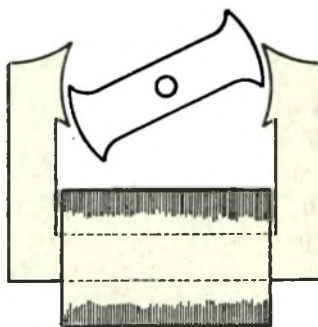


Fig. 19.

3° **Electro blindé.** — Prenons au contraire un électro blindé (fig. 18) ; désignons par r le rayon du noyau plongeur, et par x

la hauteur de la partie du noyau engagée dans la pièce polaire supérieure, par e l'entrefer. On a

$$\mathcal{R} = \frac{2\pi r x}{e},$$

d'où

$$F = (2\pi ni)^2 \cdot \frac{r}{e}.$$

La force est ici constante pendant toute l'attraction. On obtiendrait de même un couple constant dans le cas de la figure 19, la perméance étant proportionnelle à l'angle de rotation. La

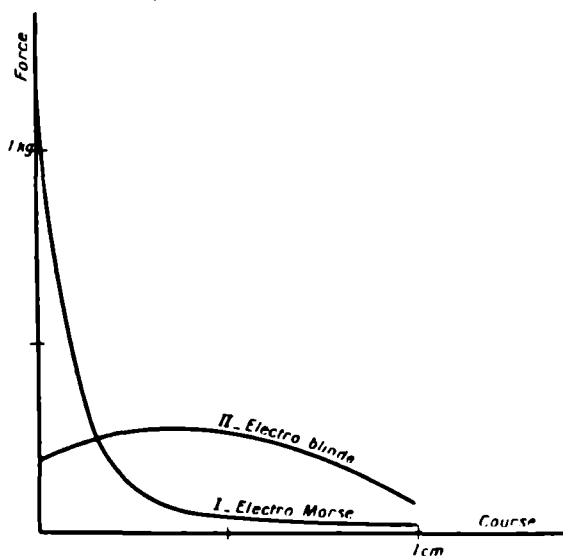


Fig. 20.

courbe II de la figure 20, relevée sur un électro blindé à longue course montre le gros avantage que l'on trouve à employer cette disposition.

Il est d'ailleurs évident qu'en modifiant le profil du noyau plongeur ou de l'armature tournante on pourrait modifier à volonté la loi d'attraction.

4^o **Alimentation à tension constante.** — Nous avons jusqu'ici supposé l'intensité rigoureusement constante ; en fait, c'est à tension constante que sont alimentés la plupart des électros, mais les conclusions précédentes sont encore valables en première approximation. Pendant le déplacement de l'armature il naît dans le circuit une force contre-électromotrice qui tend à diminuer l'intensité du courant ; il en résulte bien une légère diminution de la force attractive, mais cela ne peut en aucune manière empêcher le fonctionnement, car si l'armature s'arrêtait en cours de route, la force reprendrait aussitôt sa valeur normale.

15. Remontage. — Indiquons maintenant comment on utilise l'électro-aimant pour obtenir le remontage automatique du poids moteur.

En marche normale ce poids moteur A entraîne dans le sens de

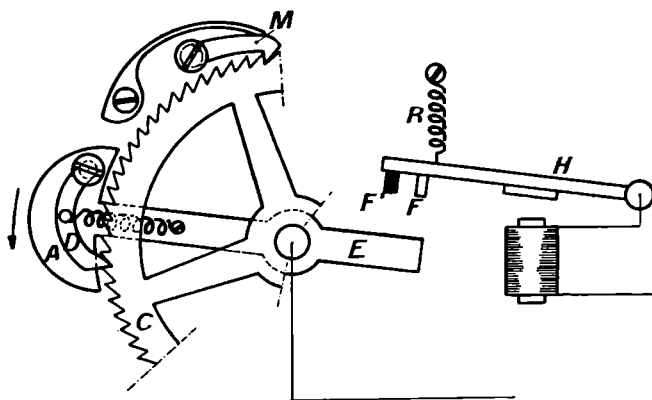


Fig. 21.

la flèche le rochet C solidaire de la roue moyenne, par l'intermédiaire du cliquet D (fig. 21).

Lorsqu'il arrive en bas de sa course, la tige qui le supporte entre par son extrémité E en contact avec la cheville conductrice F et ferme le circuit de l'électro ; l'armature H de celui-ci est attirée et fait remonter le poids jusqu'au moment où la che-

ville isolante F' s'étant substituée à F dans son contact avec E, le circuit est rompu ; l'armature est alors rappelée vers le haut par le ressort R tandis que le poids A reste maintenu en place par le cliquet D.

Pendant le remontage, le cliquet M empêche le rochet de revenir en arrière. Le remontage est presque instantané et comme il se déclanche toujours au moment où l'échappement vient d'avoir lieu, il s'effectue pendant que le rouage est immobile ; la marche de la pendule ne risque donc pas d'en être affectée.

Dans le remontage Leroy, le poids pèse 5 grammes et le rochet qui, pour plus de sécurité, est relié à son axe par un accouplement élastique, possède 225 dents. Le contact électrique commence lorsque la tige qui supporte le poids est inclinée de 12° au-dessous de l'horizontale et se termine quand elle est à 12° au-dessus ; sa durée est de $1/10$ de seconde environ.

L'électro, d'une forme analogue à celle de la figure 20, a une résistance de 50 ohms et est alimenté sous 4 volts. La forme donnée aux pièces E et F est telle que l'ouverture et la fermeture du circuit ne se produisent pas au même point ; les surfaces sont ainsi protégées contre l'altération et l'établissement du contact est franc. Une lampe de 200 ohms en dérivation sur l'électro réduit d'ailleurs considérablement l'étincelle de rupture.

Si l'attraction de l'électro était exagérée, le poids A, emporté par sa force vive, se fixerait dans une position trop élevée : pour l'éviter on dispose un rhéostat de 50 ohms sur le circuit de la pile et on le règle de manière à obtenir un remontage toutes les 30 secondes ; la fréquence des remontages n'a d'ailleurs aucune influence sensible sur la marche de la pendule (1).

16. Echappement. — Décrivons enfin l'échappement. Sa fonction est double : comptage des oscillations et entretien du mouvement du balancier. On peut le réaliser de bien des ma-

(1) Pour une des pendules de l'Observatoire de Paris, une augmentation de 1 seconde dans le temps de remontage se traduit par un retard journalier de $3/4$ de millième de seconde.

nières, chacune présentant ses avantages et ses inconvénients. Nous raisonnerons sur l'échappement à chevilles dont le fonctionnement est particulièrement commode à exposer.

1^o **Comptage des oscillations.** — La roue d'échappement d'axe O' (fig. 22) tend à tourner dans le sens de la flèche sous l'action du poids moteur ; elle porte sur la circonférence un grand nombre de chevilles équidistantes, 30 par exemple.

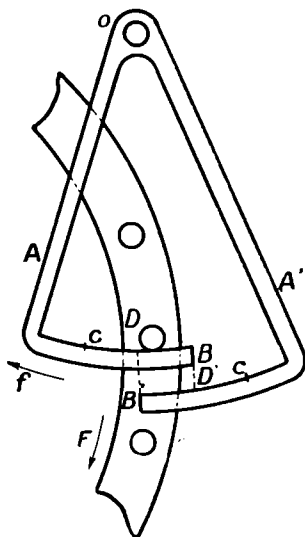


Fig. 22.

Devant elle oscille la fourchette AOA' mobile autour du point O et solidaire du balancier ; cette fourchette porte deux becs AB et $A'B'$ qui sont alternativement en contact avec une des chevilles de la roue d'échappement et s'opposent à la rotation continue de celle-ci. La forme et les dimensions de ces becs ne sont pas quelconques : ce sont des arcs de circonférence de centre O et leur distance est égale à la moitié de la distance de deux chevilles consécutives.

Supposons que le balancier vienne d'atteindre son élongation maxima

vers la droite ; les phénomènes se produisent dans l'ordre suivant :

a) Le point de contact entre la cheville et le bec AB parcourt l'arc CB , la fourchette tournant dans le sens de la flèche f et la roue d'échappement restant immobile.

b) La cheville tombe alors brusquement de B en D' , la roue d'échappement tournant de $1/60^e$ de tour.

c) Le point de contact entre la cheville et le bec $A'B'$ parcourt l'arc $D'C'$ puis en sens inverse l'arc $C'B'$.

d) La cheville abandonne brusquement la fourchette, la roue d'échappement tourne de $1/60^e$ de tour, et une nouvelle cheville vient buter en D contre le bec supérieur.

e) Le point de contact entre cette nouvelle cheville parcourt l'arc DC, puis l'arc CB..., etc., et les mêmes phénomènes se reproduisent.

A chaque oscillation complète, la roue d'échappement avance de $1/30^e$ de tour ; elle fait un tour par minute si le balancier bat la seconde.

2° **Entretien du mouvement.** — a) Pour entretenir le mouvement du balancier, il faut à chaque oscillation lui restituer une quantité d'énergie égale à celle qu'il a perdue par frottement. On peut obtenir ce résultat en terminant un des becs de la fourchette par un plan incliné ; cette fourchette reçoit ainsi de la part de la cheville, pendant le parcours BE, une impulsion dans le sens du mouvement et la transmet au balancier.

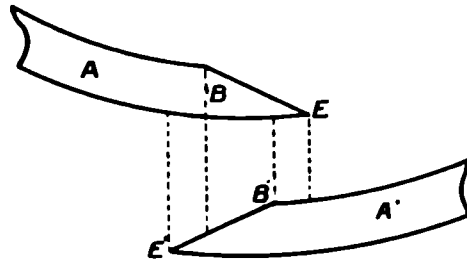


Fig. 23.

Rien n'empêche, en orientant convenablement la fourchette, d'obtenir que cette impulsion ait lieu en moyenne au moment où le pendule passe par la verticale ; un échappement de ce type dit « à coup perdu » ne modifie donc pas, s'il est bien réglé, la période du pendule libre.

Mais — et c'est pour cette raison que cet échappement n'est pas employé — pratiquement, le moindre dérèglement c'est-à-dire le moindre défaut d'aplomb produit une perturbation importante.

b) Pour éviter cet inconvénient, et aussi pour doubler le rendement, on utilise en réalité deux inclinés BE et B'E' (fig. 23) ; une mise d'aplomb défectueuse n'a plus ici qu'une importance secondaire parce que ses effets sur BE et B'E' se compensent sensiblement et l'on n'a plus à craindre de variation accidentelle provenant d'un défaut d'aplomb. Mais nous allons montrer

qu'en utilisant ainsi deux inclinés nous avons apporté à la période une modification systématique et constante, indépendante de l'aplomb.

En effet, lorsque la cheville quittant l'incliné BE tombe sur le bec A'B', elle doit le rencontrer sur l'arc de repos A'B' et non sur l'incliné B'E' ; aussi faut-il placer par construction le point E plus à droite que le point B' et par symétrie le point E' plus à gauche que le point B. Il s'ensuit que les impulsions tant sur BE que sur B'E' se feront en moyenne après le passage par la verticale.

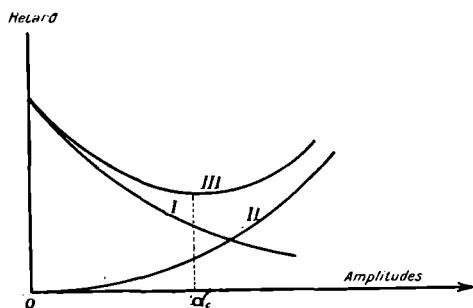


Fig. 24.

Conséquence : La période du pendule entretenu est plus grande que celle du pendule libre ; la présence d'un échappement à double impulsion fait retarder une horloge.

c) Un balancier d'horloge a donc en régime normal une période qui est plus longue que celle

des oscillations infiniment petites du pendule libre et ceci pour deux raisons :

Parce que le pendule entretenu oscille plus lentement que le pendule libre.

Parce que le pendule libre lui-même oscille plus lentement aux grandes amplitudes.

Comment varie en fonction de l'amplitude l'effet résultant de ces deux causes ? Il est aisé de s'en rendre compte. Le retard dû à l'échappement est d'autant plus faible que le rapport des arcs BE et B'E' (correspondant aux impulsions) aux arcs BC et B'C' (correspondant aux oscillations libres) est plus petit (1) ; il diminue donc quand l'amplitude augmente (courbe I de la

(1) Ce rapport est le plus souvent voisin de 2 ; on voit que le balancier est loin d'être un pendule libre.

figure 24). L'autre cause de retard croît au contraire en même temps que l'amplitude (courbe 2); la seule inspection de la figure montre que la résultante (courbe 3) passe par un minimum. C'est ce minimum que le réglage doit rendre égal à 1 seconde, c'est l'amplitude correspondante α_0 que l'on doit considérer comme l'amplitude normale de fonctionnement si l'on veut que les inévitables variations de couple moteur ou de couple résistant ne produisent dans la marche de l'horloge que le minimum de perturbations. Au voisinage de cette amplitude, peut-on dire, le pendule entretenu est plus isochrone que le pendule libre.

Pour préciser l'ordre de grandeur de cette variation de période voici les résultats obtenus sur une pendule d'observatoire en faisant varier le poids moteur (Féry).

Poids moteur	Amplitude	Retard journalier
1 kg.	0°38'	1 ^h ,47
2 kgs	1°01'	0
3 kgs	1°15'	0
4 kgs	1°23'	0 ^h ,36

On voit que pour cette pendule le poids moteur doit être compris entre 2 et 3 kilogrammes.

17. Précision. — Les horloges mécaniques remontées électriquement sont celles qui donnent les meilleurs résultats pour la conservation de l'heure. Pour donner une idée de la précision obtenue, voici quelques chiffres pris au hasard :

A l'observatoire de Genève, en 1931, la pendule Leroy 1402 a donné un écart moyen mensuel de 0^h,0084.

A l'observatoire de Greenwich, entre le 22 mars et le 9 mai 1927 les battements des secondes des deux horloges SH 3 et SH II étaient si voisins l'un de l'autre qu'il était impossible de les distinguer sur un chronographe (1).

(1) La légende raconte qu'un roi de France, Charles VI, devint fou pour avoir voulu mettre d'accord toutes les montres qu'il possédait ; on voit que depuis ce temps-là la technique a réalisé quelques progrès.

Enfin la comparaison d'une de ces horloges à balancier pendulaire et d'une horloge à cristal piézoélectrique (page 104) a permis de mettre en évidence les variations de la gravité provenant du mouvement de la Lune.

II. — HORLOGES A ENTRETIEN DIRECT

Dans ces horloges, le dispositif électrique moteur agit directement sur le balancier sans passer par l'intermédiaire d'un poids ; le balancier, à chaque oscillation, ferme au moment convenable le circuit d'une pile et actionne le mécanisme des aiguilles (1).

18. Dispositif moteur. — 1^o **Electroaimants.** — Comme système moteur, on peut évidemment employer des électro-aimants. Malheureusement ceux-ci ont un très mauvais rendement lorsqu'il s'agit de produire de faibles forces, et la raison en est simple : d'une part la perméabilité du fer est peu élevée pour les champs magnétiques faibles et d'autre part la force attractive est proportionnelle au carré de l'induction. Aussi, alors que les électro-aimants donnent de bons résultats pour les remontages (forces importantes, durée du courant très courte) ils mettent rapidement hors service les piles et les contacts si on les fait fonctionner à chaque oscillation du balancier. En outre, par suite du magnétisme rémanent, l'attraction ne s'annule jamais complètement, ce qui peut produire des perturbations dans la valeur de la période.

Les pendules actionnées directement par des électro-aimants sont aujourd'hui à peu près abandonnées ; des nombreuses réalisations dont elles ont été l'objet nous ne retiendrons que les

(1) La première pendule à entretien direct a été réalisée par Zamboni (1830) ; elle rappelait l'expérience de l'« araignée de Franklin », le couple étant d'origine électrostatique. Quelques années plus tard (1840) Bain fit fonctionner une pendule à électro-aimant en utilisant comme source d'énergie deux plaques, l'une de zinc, l'autre de cuivre enfouies dans le sol humide.

deux dispositifs suivants, fort intéressants et souvent employés dans d'autres appareils pour rendre l'amplitude des oscillations indépendante de la tension de la pile.

a) *Contact de Hipp.* — Il est schématiquement représenté sur la figure 25. Tant que l'amplitude des oscillations est grande, la petite palette *p* très mobile autour du point *O* ne fait que s'incliner au passage des dents *m* et *n*. Mais lorsque l'amplitude a diminué suffisamment pour que en fin de course la dent *m* seule ait dépassé la palette, la dent *n* étant restée en deçà, au moment où le pendule revient en arrière vers la gauche de la figure, la palette coincée entre

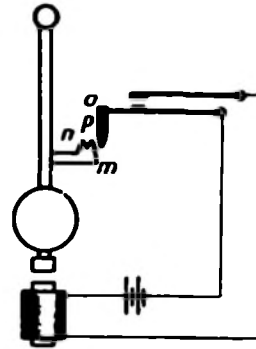


Fig. 25.

les deux dents par son extrémité inférieure se soulève et ferme le contact.

Ainsi, à mesure que la tension de la pile diminue, la fréquence des impulsions motrices augmente, mais l'amplitude n'en est pas affectée.

b) *Dispositif de Fery* (fig. 26). — Le poids moteur *P* est porté par une tige mobile autour du point *O*. Lorsque le pendule se dirige vers la gauche,

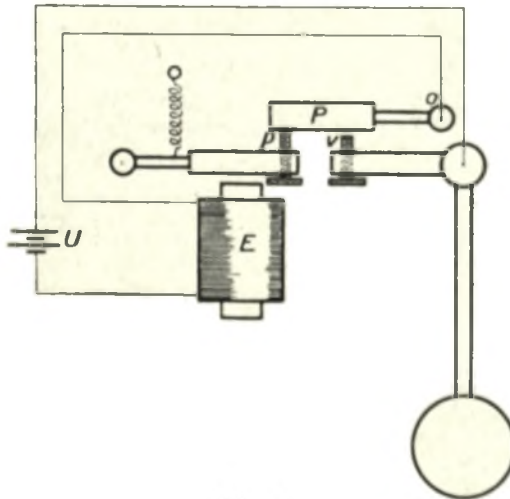


Fig. 26.

che, la pointe de la vis *v* rencontre, un peu avant la fin de l'oscillation, le poids *P* et ferme le circuit de la pile *U* à travers l'électro *E*. Celui-ci attire aussitôt son armature, la pointe *p*

descendant d'une hauteur h . Le pendule continuant sa course soulève le poids P d'une hauteur H puis, le mouvement changeant de sens, le poids P redescend en agissant sur le pendule jusqu'à ce qu'il soit arrêté par la pointe p , c'est-à-dire après un parcours $H + h$. Le mouvement du pendule continuant, la vis ν quitte le poids P , interrompant le circuit de l'électro, ce qui permet au ressort R de rappeler l'armature dans sa position initiale.

Le travail fourni au pendule à chaque oscillation a pour expression $— PH + P(H + h) = Ph$; il est indépendant de la force exercée par l'électro sur l'armature, c'est-à-dire de la tension de la pile.

Sur le schéma indiqué, l'impulsion a lieu en fin de course, et par conséquent a sur la période une influence considérable ; mais on imaginerait facilement un dispositif produisant cette impulsion au moment où le balancier passe par la verticale.

2° Aimant et bobine. — Actuellement on utilise dans les horloges à entretien direct l'attraction qu'exerce sur un aimant permanent une bobine sans fer lorsqu'elle est traversée par le courant d'une pile. Ces horloges, depuis les premiers travaux de Féry, ont fait l'objet de nombreux perfectionnements sans que l'on soit arrivé cependant à leur donner la sûreté de marche des garde-temps à remontage. Nous commencerons leur étude par la description du dispositif qui assure en temps utile le passage du courant.

19. Contact. — 1° Fonctionnement. — Au balancier est associé un contact qui ferme périodiquement le circuit de la pile dans des conditions telles que l'entretien des oscillations soit assuré (cette fermeture a lieu pour un seul sens du mouvement qui dépend de la polarité de la pile et du mode d'enroulement de la bobine).

En principe, la fermeture de ce contact peut avoir lieu :

soit pendant une demi-oscillation entière,
soit pour un angle déterminé.

a) On obtient la fermeture du contact pendant une demi-oscillation en faisant osciller le balancier B (fig. 27) entre deux goujons très rapprochés GG' portés par une plaque isolante P mobile, mais dont le déplacement s'accompagne d'un léger frottement. De la sorte quand le balancier se dirige vers la gauche, il appuie constamment sur le goujon G réuni à la pile et ferme le circuit ; quand il se dirige vers la droite, il appuie au contraire sur G' isolé et le circuit est interrompu.

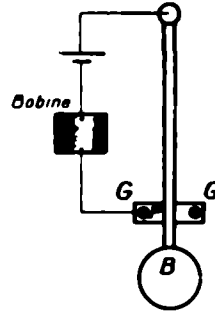


Fig. 27.

Ce dispositif est loin d'être autorégulateur car il exagère l'énergie fournie au balancier lors des grandes amplitudes ; par contre comme il conduit à des intensités de courant relativement faibles, il améliore le rendement électrique.

b) Le second mode de fonctionnement (fermeture du contact pour toutes les valeurs de l'élongation comprises entre deux limites déterminées) peut être facilement

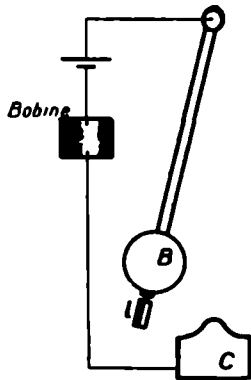


Fig. 28.

réalisé par une languette métallique *l* (fig. 28) disposée à la partie inférieure du pendule B et qui vient à chaque demi-oscillation s'appuyer sur une came fixe C ; en garnissant de fibre un des côtés de cette languette on obtient que le contact n'ait lieu que pour un seul sens. Mais, le plus souvent comme nous le verrons plus loin (contact Ato, page 54), on obtient ce résultat en combinant avec le mécanisme de commande des aiguilles un poussoir à ressort.

Ce dispositif, à l'inverse du précédent, est auto-régulateur, car le temps d'impulsion diminue lorsque l'amplitude augmente ; par contre, comme il exige une intensité plus élevée, il diminue le rendement électrique.

2° Réalisation d'un bon contact. — La réalisation d'un bon contact est d'une importance fondamentale en horlogerie électrique ; ce n'est pourtant pas chose facile, car ce contact doit satisfaire à de multiples conditions quelque peu contradictoires, en particulier aux suivantes :

Il doit fonctionner pendant de longues années sans nettoyage en restant toujours identique à lui-même ; les surfaces en contact doivent glisser les unes sur les autres pour assurer un balayage automatique des poussières nuisibles.

La pression de contact doit être assez élevée pour que la résistance opposée au passage du courant soit sensiblement nulle et qu'il n'y ait pas de vibrations. Par contre, l'énergie empruntée au pendule pour actionner le dispositif de contact doit être très faible et surtout bien constante pour ne pas influencer la période.

Si pour une raison quelconque le balancier vient à s'arrêter, le circuit ne doit pas rester fermé ; le contact doit assurer si possible le démarrage de la pendule.

Enfin, il faut éviter tout bruit désagréable.

A titre d'exemple, nous allons décrire en détail un contact à demi-oscillation (pendulette Ato), un contact à angle constant (pendule Ato) ainsi qu'un contact Bulle Clock qui présente des qualités intermédiaires.

3° Contact de la pendulette Ato (fig. 29). — Deux goupilles situées dans le plan de la figure (G_3 en or et G_4 en laiton) réunies par leur partie inférieure constituent une fourche qui peut osciller autour d'un axe O porté par le balancier. Un ressort R appuyant sur cet axe assure sa connexion électrique avec le pôle positif de la pile en shuntant les pivots huilés et, par le frottement qu'il provoque, stabilise la position de cette fourche.

Deux autres goupilles *fixes* perpendiculaires au plan de la figure (G_1 platinée et réunie au pôle négatif de la pile, G_2 en acier) viennent pendant le déplacement du balancier alternativement en contact avec les précédentes. Lorsque le balancier va de gauche à droite, c'est G_1 qui entre en contact avec G_3 et le

courant passe ; quand l'oscillation se produit en sens inverse, c'est G_2 qui appuie sur G_4 et le circuit est rompu.

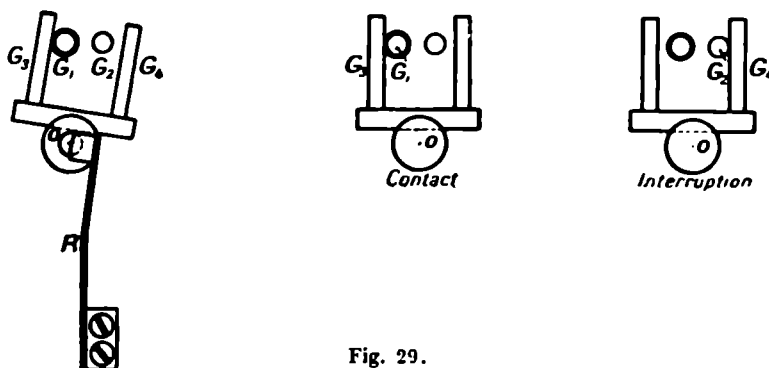


Fig. 29.

Ces contacts alternatifs se produisant même pour de très petites amplitudes, la pendule se met pratiquement en route sans qu'on soit obligé de la lancer à la main.

4° **Contact Bulle Clock.** — Le dispositif de contact de la Bulle Clock est constitué par les trois organes suivants (fig. 30) :

- La fourchette F.
- La goupille G.
- Le ressort R.

La fourchette est en acier trempé de faible épaisseur. Sa partie supérieure est analogue à celle d'un échappement à ancre pour montre. De chaque côté de son entrée est rivée une garniture dépassant légèrement les côtés intérieurs de celle-ci ; l'une d'elles *a* est en argent, l'autre *f* est en fibre et par conséquent isolante. Une rondelle en fibre *r* empêche l'huile de remonter par capillarité le long de la fourchette et d'atteindre ainsi les pièces conductrices du contact. Cette fourchette assure la commande du mécanisme d'entraînement des aiguilles au moyen d'un système d'encliquetage qui toutes les secondes fait avancer d'une dent une roue à rochet.

La goupille *G* est en argent ; elle est montée sur une pièce de raccord fixée à la tige d'acier du balancier ; son diamètre est un peu inférieur à la largeur de l'encoche, de sorte qu'elle s'y loge avec un peu de jeu.

Le ressort *R* est en argent ; une de ses extrémités est fixée à une plaquette *p* articulée sur la platine ; l'autre qui affecte la forme d'une large boucle est agrafée à la gorge d'une petite poulie *T* en argent portée par l'axe de la fourchette. Les dimensions de cette boucle et de la poulie ont été choisies telles qu'il ne puisse y avoir de glissement entre elles ; leur déplacement relatif s'effectue uniquement par roulement, ce qui est indispensable si l'on veut éviter toute usure aux surfaces en présence qui, devant assurer le passage d'un courant, ne peuvent être lubrifiées.

Le ressort *R* assure la connexion électrique entre la fourchette et la platine du mécanisme (on aurait de mauvais contacts si l'on voulait amener le courant à la fourchette uniquement par son axe, les trous de pivotement étant abondamment huilés). En outre, en augmentant le frottement des pivots, il stabilise la fourchette, cherchant constamment à la maintenir dans sa position actuelle.

Voici comment fonctionne ce contact :

Lorsque la goupille *G* qui est solidaire du pendule se déplace vers la gauche, elle agit sur la garniture conductrice *a* de l'encoche de la fourchette ; celle-ci se trouve donc entraînée, en même temps que le contact électrique s'établit. Mais, par construction, la goupille ne pénètre qu'imparfaitement dans l'encoche (d'une quantité égale aux trois quarts de son diamètre

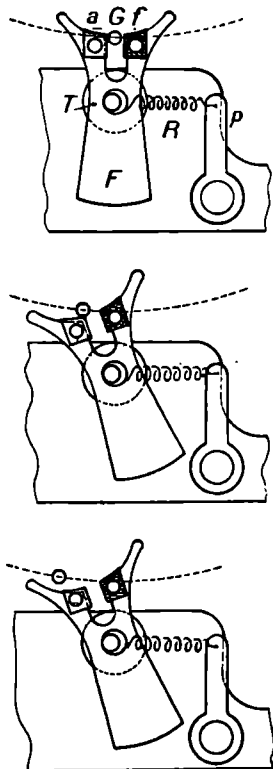


Fig. 30.

lorsque le pendule passe par la verticale). Aussi arrive-t-il qu'après un certain parcours, la goupille s'échappe de l'encoche, rompant ainsi le contact. La fourchette s'arrête alors, après avoir en vertu de son inertie parcouru un petit arc supplémentaire, et est maintenue dans cette position par le ressort R. Le pendule entièrement libéré continue ensuite son oscillation, atteint son élongation maxima, s'arrête puis revient vers la droite ; lorsque la goupille rencontre à nouveau la fourchette, c'est sur la garniture isolante *f* qu'elle vient agir, de sorte qu'elle l'entraîne sans rétablir le courant. Le contact électrique n'est donc établi que lorsque le déplacement du pendule a lieu vers la gauche et pour une partie bien constante de la course.

Une des caractéristiques du dispositif précédent, c'est que le contact se produit sous une forte pression. On se rappelle en effet que la fourchette, par l'intermédiaire du cliquet et du rochet, entraîne tout le mécanisme de commande des aiguilles ; sa réaction sur la goupille est par suite très importante.

Enfin, la largeur de l'échancrure étant à peine supérieure au diamètre de la goupille, la fermeture périodique du contact a lieu même pour des amplitudes très faibles, de sorte que pratiquement le pendule se met en marche sans qu'il soit nécessaire de le lancer à la main.

La commande des aiguilles a lieu par l'intermédiaire d'une vis sans fin et d'une roue à rochet (fig. 31) ; un cliquet solidaire de la fourchette fait à chaque oscillation avancer la roue à rochet

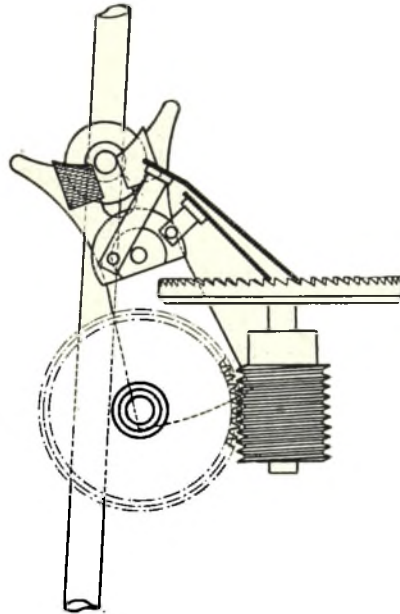


Fig. 31.

d'une dent (et d'une seule car, la goupille D s'échappant en fin de course, le déplacement de la fourchette est limité, quelle que soit l'amplitude du balancier); un contre-cliquet empêche tout mouvement de recul.

5° **Contact pendule Ato** (fig. 32). — Une roue à rochet R portant huit dents et constituant le premier mobile du rouage est manœuvrée par un cliquet Cl articulé sur la tige du balancier; un sautoir s empêche le rochet de revenir en arrière. A chaque oscillation le cliquet Cl poussé par le balancier fait avancer le rochet d'une dent tandis que le sautoir s soulevé par le galet G établit entre la cheville platinée C et la lame d'or l un bref contact électrique.

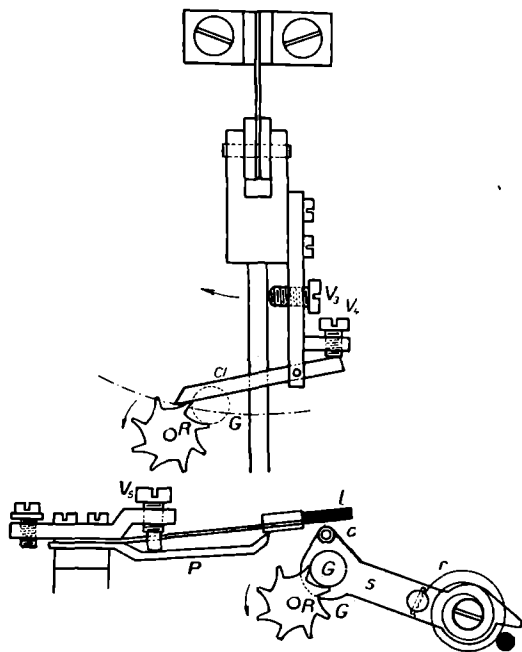


Fig. 32.

Sur le sautoir est attaché un ressort spiral *r* dont la virole est solidaire du bâti et qui permet d'éviter le passage du courant à travers les pivots huilés.

La vis V_3 règle l'élongation pour laquelle le cliquet vient

attaquer la dent du rochet; en principe, pour un régulateur normal, la menée du rochet par le cliquet doit commencer lorsque l'extrémité inférieure du balancier se trouve à 8 millimètres en deçà de sa position d'équilibre et cesser à 7 millimètres au delà; le contact électrique commence 6 millimètres avant la position d'équilibre et finit 7 millimètres après.

La vis V_4 règle la pénétration du cliquet Cl dans la denture. Elle doit être en principe dans une position telle que le cliquet conduise la dent du rochet sur $\frac{1}{8}$ de tour, mais ce réglage n'a rien d'absolu. Si la pénétration était exagérée, elle provoquerait tout simplement après chaque menée un retour en arrière de la roue à rochet. Si elle était au contraire trop faible, l'avance d'une dent à chaque oscillation serait quand même assurée par la réaction du galet G porté par le sautoir s.

La lamelle de contact l garnie d'or appuie sur la plaque P avec une force de 8 décigrammes (1) et doit, lorsque le rochet est au repos, être écartée de la cheville C de $3/10$ de millimètre, de manière à couper franchement le courant. La poussée exercée par le sautoir sur le rochet au repos se règle en faisant tourner la virole du ressort r et doit être de 3 décigrammes. Lorsque le galet G est soulevé, il exerce donc sur la dent une réaction de 11 décigrammes.

Ce contact, comme la plupart de ceux qui sont solidaires du mécanisme des aiguilles, ne commence à fonctionner qu' pour des amplitudes notables ; aussi doit-on au moment du démarrage donner avec la main une légère impulsion au balancier.

20. Couple moteur. — *a)* Dans ce type d'horloges, la recherche des meilleures conditions d'établissement de l'organe moteur est un problème industriellement très complexe, où entrent en jeu non seulement les lois classiques de l'électromagnétisme, mais encore les nécessités de la fabrication, ainsi que l'obligation d'abaisser le prix de revient et de réduire l'encombrement. Aussi constate-t-on dans les conceptions des inventeurs de très grandes divergences. C'est ainsi que dans certaines horloges on utilise des bobines de très petites dimensions se déplaçant dans des entrefers très étroits, tandis que dans d'autres on fait usage de grosses bobines et d'aimants droits. Tantôt les

(1) Ces forces se mesurent facilement au moyen de petits dynamomètres spéciaux.

pôles se déplacent devant la bobine parallèlement au plan des spires, tantôt ils pénètrent à l'intérieur ; certaines bobines sont très allongées alors que d'autres ont la forme de galettes extrêmement plates.

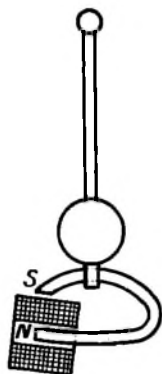


Fig. 33.

La pendule représentée schématiquement sur la figure 33 est équipée avec un aimant en fer à cheval (Lepaute, Brillié) à faible entrefer de sorte que le flux utile est localisé dans une faible portion de l'espace. L'avantage de ce dispositif est évident lorsque la durée du contact est très courte, car alors on peut adopter une bobine plate et par suite de faible résistance. Par contre, comme le jeu disponible entre l'aimant et la bobine est forcément très faible, la mise en place de la pendule devient délicate, un défaut d'aplomb risquant de provoquer l'arrêt par frottement.

Ce dernier inconvénient est fortement diminué lorsque, comme sur la figure 34, on emploie un aimant sensiblement rectiligne (Ato). Mais alors celui-ci doit être constitué par de l'acier au

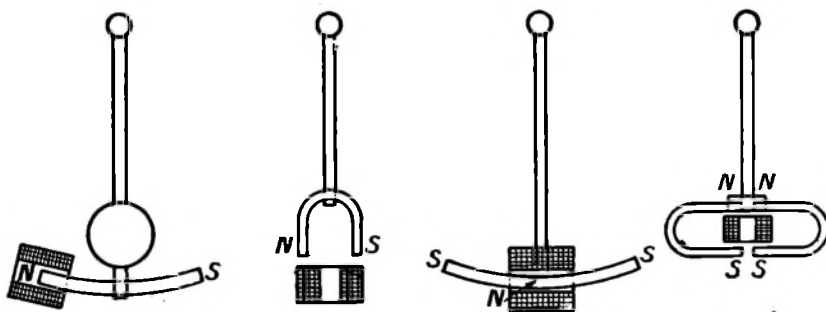


Fig. 34 à 37.

cobalt pour qu'il puisse conserver une aimantation durable malgré la présence d'un champ démagnétisant important ; cette forme d'aimant doit être associée en principe à une bobine longue et à un contact relativement prolongé.

Dans le cas des figures 35 (Bardon) et 37 (Garnier) l'aimant se déplace simplement devant la bobine sans pénétrer à l'intérieur ; tout frottement entre la partie mobile et la partie fixe est évidemment impossible.

Enfin dans la Bulle Clock (fig. 36) c'est la bobine qui est mobile, tandis que l'aimant est fixe ; cette disposition complique

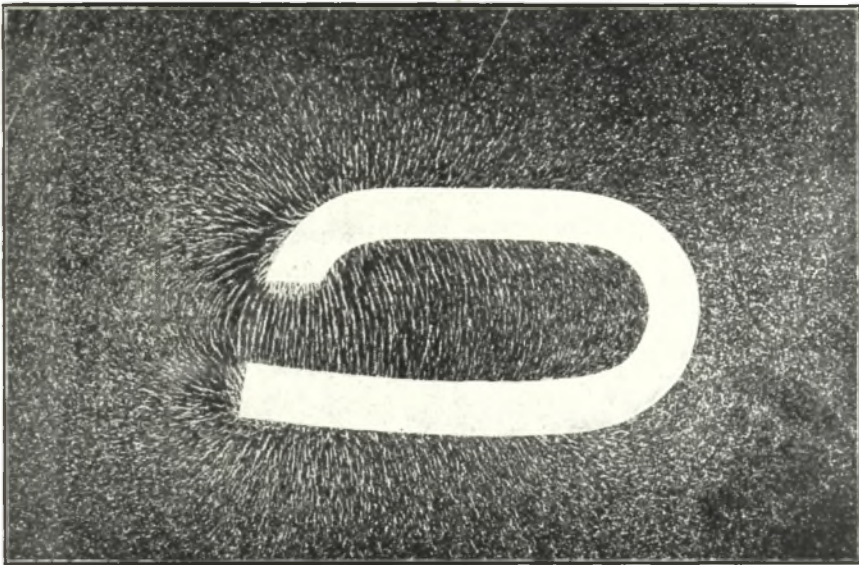


Fig. 38.

évidemment un peu le montage électrique, mais elle permet par contre de donner à l'aimant une grande longueur ; on en profite pour donner à celui-ci un pôle conséquent dans sa partie médiane ; ce mode d'aimantation permet d'obtenir dans un espace très étendu des lignes de forces sensiblement normales à l'axe, et il est ainsi possible d'obtenir un couple moteur puissant et régulier tout en laissant un jeu important entre la bobine et l'aimant.

Les figures 38, 39 et 40 représentent le spectre magnétique de quelques aimants précédents et montrent que la répartition des

lignes de force peut être très différente suivant les cas. Ces spectres, quoique très intéressants, ne suffisent cependant pas pour

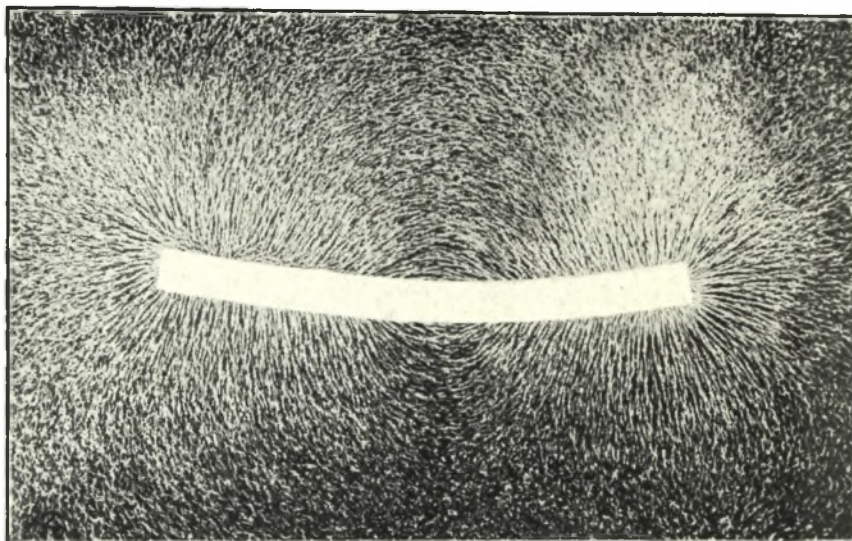


Fig. 39.

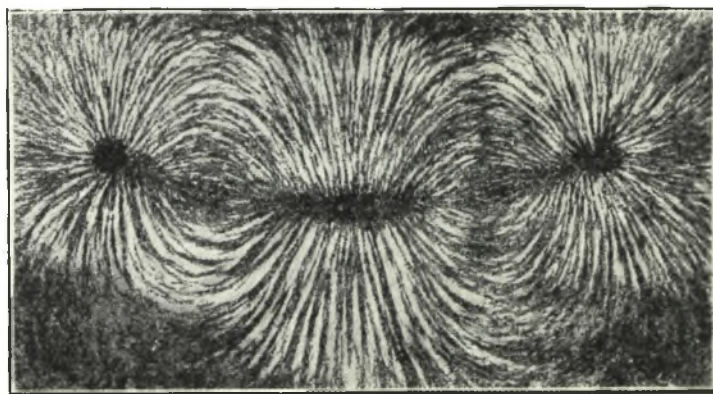


Fig. 40.

caractériser le système moteur car il faut tenir compte également de l'intensité du champ ainsi que du nombre de spires de

la bobine et de ses dimensions. Aussi les mesures au fluxmètre sont-elles plus instructives. On peut, en faisant usage de cet appareil, étudier le flux φ qui traverse l'ensemble des spires de la bobine en fonction de l'élongation du balancier ; c'est ainsi qu'ont été tracées, en utilisant pour les ordonnées des échelles arbitraires, les courbes des figures 41 (Lepaute et Bardon) et 42

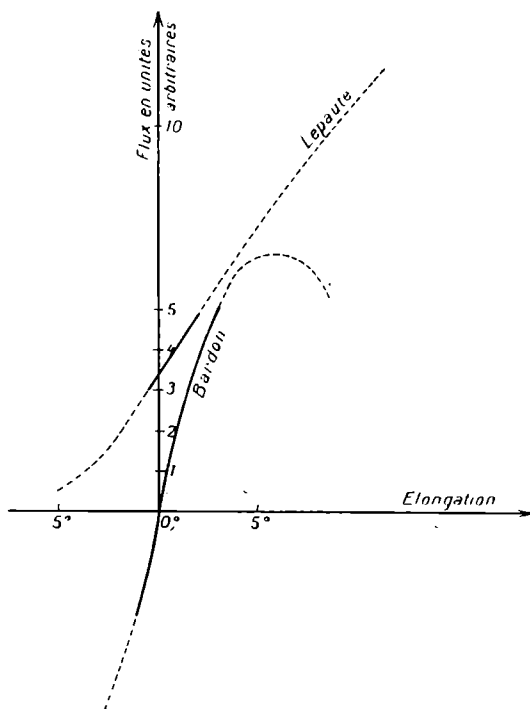


Fig. 41.

(Ato) ; les parties en traits pleins sont seules utilisées pendant le contact).

b) Désignons toujours par φ le flux qui pour une certaine élongation θ du balancier traverse l'ensemble des spires de la bobine ; appelons i l'intensité du courant et cherchons comment varie en fonction de l'élongation le couple moteur :

$$C = i \frac{d\varphi}{d\theta}$$

La valeur de $\frac{d\varphi}{d\theta}$ nous est donnée immédiatement par un essai au fluxmètre ; elle peut présenter d'ailleurs plusieurs régions de signe constant favorables à l'entretien.

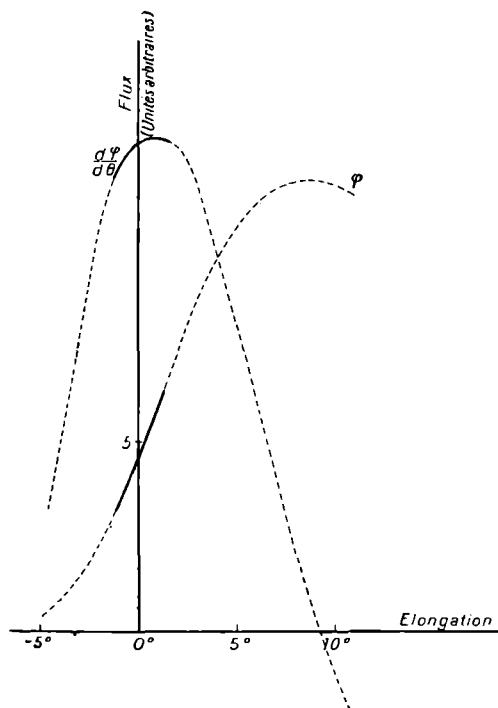


Fig. 42.

Reste à déterminer le courant i ; son intensité est loin d'être constante par suite de l'existence, pendant le mouvement, d'une force contre-électromotrice d'induction. Mais celle-ci ayant comme expression

$$e = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\varphi}{d\theta} \frac{d\theta}{dt}$$

est connue immédiatement pour chaque valeur de l'élongation puisque nous connaissons déjà $\frac{d\varphi}{d\theta}$ et puisque $\frac{d\theta}{dt}$ est représenté

en fonction de θ par une ellipse. C'est ainsi, par exemple, que nous avons déterminé sur la figure 43 la force contre-électromotrice d'une pendule Ato pour son amplitude normale de 3° (1) ; on voit que dans ce cas particulier cette force électromotrice passe par un maximum pour $\theta = 0^\circ 30'$ environ.

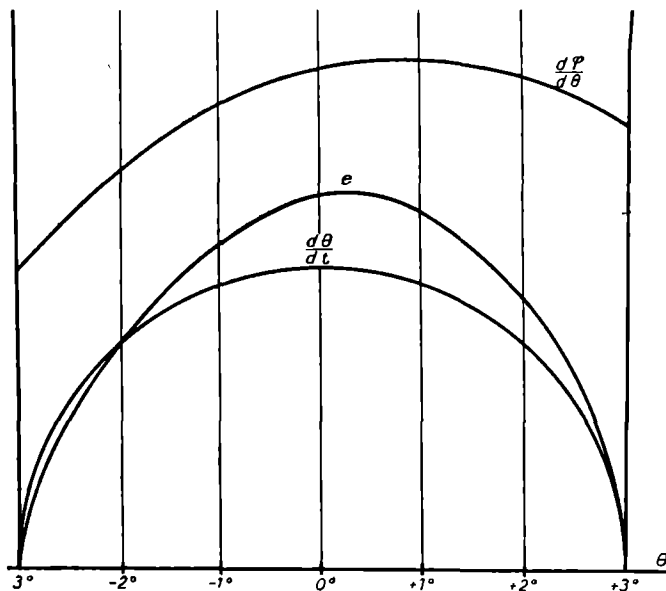


Fig. 43.

Entretenons le mouvement au moyen d'une pile de tension constante U ; le champ propre de la bobine étant toujours négligeable par rapport à celui de l'aimant, les phénomènes de self-induction n'interviennent pas et l'intensité est simplement donnée par la formule

$$i = \frac{U - e}{R},$$

R représentant la résistance du circuit.

(1) Sur la figure, on a pour simplifier la construction remplacé l'ellipse par un cercle ; la force électromotrice est par suite obtenue en unités arbitraires.

Cette intensité et par suite le couple moteur se déterminent donc sans difficulté. On doit remarquer que suivant l'importance relative de U et de e , la courbe qui représente l'intensité peut soit rester presque horizontale (fig. 44, courbe I), soit présenter une échancrure très accentuée (courbe II). Par suite, le couple

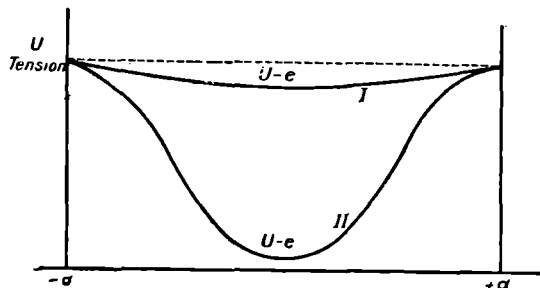


Fig. 44.

moteur pourra présenter soit un seul maximum (fig. 45, courbe I), soit un palier assez étendu (courbe II), soit deux maxima (courbe III). Comme d'ailleurs on peut limiter le contact

à un arc déterminé ou déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre les courbes représentant $\frac{d\theta}{dt}$ et $\frac{d\phi}{d\theta}$, on se rend compte

que l'allure, du couple en fonction de l'élongation peut prendre les formes les plus variées et que le constructeur dispose d'un nombre suffisant de paramètres pour obtenir telle loi qu'il se sera imposé à l'avance.

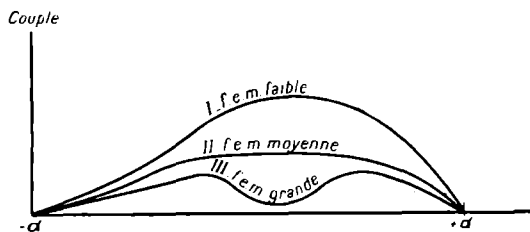


Fig. 45.

REMARQUE. —

L'emploi du flux-mètre nous a permis

d'étudier complètement le fonctionnement de la pendule et de déterminer la valeur du couple moteur. Mais il est évidemment préférable, ne fût-ce qu'à titre de vérification, de ne pas s'en tenir à des mesures de flux et de demander à d'autres appareils des renseignements complémentaires ; en particulier un oscillographe peut inscrire directement i et e en fonction du temps, tandis que par des mesures statiques au dynamomètre (le pendule étant arrêté)

on peut obtenir la valeur de $\frac{d\phi}{d\theta}$ le courant constant i étant lu sur un milliampèremètre.

21. Rendement électrique. — Ces horloges à aimant doivent être alimentées pendant des années par une simple pile sèche dissimulée à l'intérieur du bâti et par conséquent de dimensions très réduites ; aussi la question du rendement électrique prend-elle ici une importance considérable.

Dans le calcul de ce rendement, nous pouvons négliger l'énergie perdue dans l'étincelle de rupture, énergie insignifiante puisque le circuit magnétique ne contient pas de fer *doux* ; le rendement est donc uniquement limité par l'effet Joule.

L'équation

$$i = \frac{U - e}{R}$$

qui donne l'intensité du courant peut se mettre sous la forme

$$\int_0^T U i \, dt = \int_0^T e i \, dt + \int_0^T R i^2 \, dt$$

ce qui nous montre que l'énergie $\int_0^T U i \, dt$ fournie par la pile pendant une période se transforme partie en travail mécanique $\int_0^T e i \, dt$, partie en chaleur Joule $\int_0^T R i^2 \, dt$; le rendement a donc pour expression :

$$\rho = \frac{\int_0^T e i \, dt}{\int_0^T U i \, dt}$$

ou encore

$$\rho = \frac{\int_0^T U i \, dt - \int_0^T R i^2 \, dt}{\int_0^T U i \, dt}.$$

Ces formules nous indiquent que le rendement est d'autant meilleur que l'intensité du courant est plus faible ; nous en concluons immédiatement que :

a) On a tout intérêt (si l'on considère seulement le rendement et non la régularité de la marche) à prolonger le contact autant que possible.

b) C'est lorsque la pile d'entretien est usée, au moment où la pendule est sur le point de s'arrêter, que le rendement est le plus élevé.

A titre d'exemple, calculons le rendement de deux pendules, de types bien différents, l'une (pendulette) possédant un aimant



Fig. 46.

de faibles dimensions, bobinée en fil fin, mais dont le contact dure presque une demi-période, l'autre (pendule distributrice) équipée avec un fort aimant, une grosse bobine, mais munie d'un contact bref.

1° L'étude oscillographique du courant de la pendulette alimentée sous 1 volt (tension minima permettant l'entretien des oscillations) fournit la courbe de la figure 46 ; on en déduit la courbe représentant en fonction du temps le carré de l'intensité, puis par une intégration graphique, l'intensité efficace du courant pendant la durée du contact.

$$I \text{ moyen} = 0,21 \text{ milliampère.}$$

$$I \text{ efficace} = 0,225 \text{ milliampère.}$$

La résistance de la bobine étant de 3 020 ohms, la puissance moyenne perdue par effet Joule pendant la durée du contact est de :

$$W = 3\,020 \times 0,225^2 \cdot 10^{-6} = 0,153 \cdot 10^{-3} \text{ watts,}$$

tandis que la puissance moyenne fournie par la pile pendant le même temps est :

$$W' = 0,21 \cdot 10^{-3} \text{ watts.}$$

Le rendement a pour valeur :

$$\rho = \frac{0,21 - 0,153}{0,21} = 27 \text{ p. 100.}$$

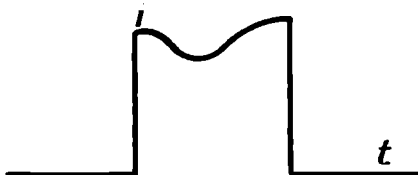


Fig. 47.

Sous 2,5 volts (tension maxima que peut supporter la pendule sans rebattre), le courant est nettement plus fort (fig. 47) et le rendement inférieur. On obtient les valeurs suivantes :

$$I \text{ moyen} = 0,615 \text{ milliampère.}$$

$$I \text{ efficace.} = 0,64 \text{ milliampère.}$$

$$W = 3\,020 \times 0,64^2 \cdot 10^{-6} = 1,24 \cdot 10^{-3} \text{ watts}$$

$$\text{d'où } W' = 2,5 \times 0,615 \cdot 10^{-3} = 1,54 \cdot 10^{-3} \text{ watts}$$

$$\rho = \frac{1,54 - 1,24}{1,54} = 19,5 \text{ p. 100.}$$



Fig. 48.

2° Pour la pendule distributrice, on a enregistré sur le même cliché (fig. 48) au cours de deux oscillations consécutives, suc-

cessivement le courant i (à gauche) et la force contre-électromotrice e (à droite) ; l'essai a eu lieu sous une tension de 1,4 volts (minimum compatible avec l'entretien).

La construction par points de la courbe donnant en fonction du temps le produit ei a permis, par une intégration graphique, d'obtenir :

$$W = 0,575 \text{ milliwatts}$$

tandis que W' a pour valeur :

$$W' = 0,84 \text{ milliwatts.}$$

Le rendement est :

$$\rho = \frac{0,575}{0,84} = 68 \text{ p. } 100,$$

résultat qui, malgré la faible durée du contact, reste bien supérieur à celui qu'avait fourni la pendulette.

22. Réalisation. — Pour réaliser une bonne horloge, il faut pouvoir obtenir, en principe, que l'amplitude du mouvement reste très faible et que les efforts tant moteurs que résistants aient lieu instantanément au moment du passage par la verticale.

Mais il convient également, pour qu'une telle horloge trouve dans le commerce des débouchés suffisants, qu'elle satisfasse à certaines conditions d'encombrement et de prix de revient. Depuis longtemps les constructeurs se sont attachés à chercher un compromis entre ces conditions plutôt contradictoires et nous allons indiquer dans leurs grandes lignes les solutions proposées.

1° Entretien par cellule photo-électrique. — La solution la plus parfaite consiste à supprimer tout contact matériel et à produire au moment du passage par la verticale, une impulsion brusque provoquée par le mouvement d'un rayon lumineux commandé par le balancier.

Par suite de sa complication, ce dispositif n'est évidemment

utilisable que dans des laboratoires de haute précision et nous ne ferons que le signaler.

2° **Entretien par condensateur** (fig. 49). — Pour obtenir des résultats théoriquement moins parfaits, mais cependant très satisfaisants, on peut essayer d'utiliser la décharge apériodique d'un condensateur. Au moment précis où le pendule passe par la verticale ce condensateur C se décharge à travers la bobine B et produit une impulsion motrice instantanée. A la demi-oscillation suivante le condensateur en se chargeant actionne un relai R qui commande les aiguilles ou synchronise une pendulette.

Un tel dispositif ne comportant aucun rouage est à l'abri des perturbations provenant de l'épaississement des huiles. A moins que les contacts ne soient dans un état déplorable la charge du condensateur restera pratiquement instantanée ; enfin l'entretien se bornera à maintenir constante la tension de la pile.

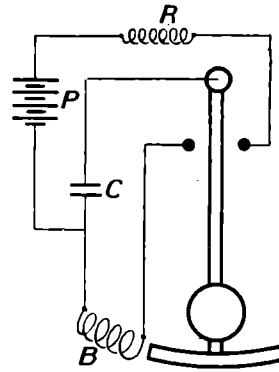


Fig. 49.

Pourtant cette solution, malgré sa perfection théorique, présente en pratique quelques inconvénients :

a) Marchant à une très faible amplitude le pendule ne peut, comme le précédent d'ailleurs, avoir une puissance réglante suffisante que s'il est long ; aussi le dispositif n'est-il applicable qu'aux pendules battant la seconde.

b) La tension d'alimentation doit être assez élevée ; nous pouvons en effet admettre pour fixer les idées qu'une telle horloge absorbera comme une horloge ordinaire une centaine de microcoulombs par oscillation ; si nous voulons que la charge se produise en $\frac{1}{100}$ de seconde, il faut que le courant moyen soit de 10 milliampères, de sorte que le courant maximum sera, par suite de la forme exponentielle de la courbe de charge, de l'ordre

de 20 milliampères ; il en résulte pour une horloge de 2.000 ohms de résistance une tension de 40 volts et une capacité de 2,5 microfarads.

c) Le rendement est déplorable, $\frac{40}{1,5} = 27$ fois plus faible que pour la même horloge marchant sans condensateur avec une pile de 1,5 volts.

Enfin pour éviter l'emploi d'un relai, nous pouvons actionner directement les aiguilles par l'intermédiaire d'une roue à rochet qui sera au moment précis du passage par la verticale commandée par un cliquet fixé à la partie inférieure du pendule, mais il faudra alors, pour que cette manœuvre n'apporte aucune perturbation dans la marche du pendule, qu'elle soit instantanée, c'est-à-dire que les aiguilles avancent sous l'influence d'un choc brutal, d'où rendement mécanique déplorable.

3^o **Solution Bulle Clock.** — Pour améliorer le rendement et permettre le fonctionnement sous 1,5 volt seulement, augmentons notablement la durée du courant d'entretien ; nous n'employons plus de condensateur et envoyons directement dans la bobine, lorsque le contact est fermé, le courant fourni par la pile. Naturellement, comme l'impulsion dépend cette fois du temps pendant lequel passe le courant, nous devons réaliser un contact particulièrement sûr et robuste absorbant pour son fonctionnement une quantité d'énergie appréciable ; actionnons en outre les aiguilles au moyen d'un encliquetage.

Le balancier reçoit de l'énergie de la part du système électromagnétique et en fournit au contraire pour la manœuvre du contact et des aiguilles. Arrangeons-nous pour qu'à *chaque instant* l'énergie reçue par le balancier soit égale à celle qu'il restitue et tout se passera comme pour le pendule libre ; la période n'aura pas été modifiée par l'entretien ; si nous voulons une puissance réglante importante nous augmentons l'amplitude, mais en même temps nous ajoutons un compensateur d'isochronisme. Telle est la solution Bulle Clock.

Il est évidemment impossible d'obtenir la neutralisation ri-

goureuse de ces différents effets perturbateurs, d'autant plus que ce qui importe au fond pour la précision de la pendule ce n'est pas la valeur effective de ces effets au moment de la mise en route, mais leur variation sous l'influence des causes les plus diverses, affaiblissement de la pile, épaissement des huiles ou détérioration des contacts... Toutefois, on peut essayer de s'en approcher par un choix convenable des organes mis en jeu ; nous avons déjà vu (page 62) que l'on peut à volonté changer l'allure du couple moteur ; on peut agir de même sur le couple résistant en modifiant l'inertie des pièces en mouvement ou en créant des frottements supplémentaires.

4° Solution Ato, etc. — Arrangeons-nous pour que les couples résistants (manœuvre du rouage et du contact) se produisent en moyenne un peu avant le passage par la verticale, tandis que l'impulsion motrice se produit plutôt après (1), nous savons (page 45) que la période sera modifiée, mais qu'elle passera par un minimum pour une certaine amplitude. Adoptons celle-ci comme amplitude de régime (Ato, Lepaute) et les petites variations dans les conditions de fonctionnement n'auront pas d'influence sensible sur la marche de la pendule.

5° Cas particulier des pendulettes. — Les solutions précédentes se montrent très satisfaisantes pour les pendules murales battant la demi-seconde (balancier de 25 centimètres) mais elles ne conviennent plus pour les pendulettes qui, pour des raisons d'esthétique, doivent avoir une faible hauteur (balancier de 6 cm. 2 battant le quart de seconde pour la pendulette Ato) et dont l'aplomb est rarement respecté.

Il faut absolument dans ce cas réduire les dimensions de la bobine, augmenter sa résistance par conséquent, et pour que le rendement soit malgré cela satisfaisant, augmenter également autant que possible la durée du contact (contact pendulette,

(1) On a vu, au moment de la description du contact Ato, que le courant ne commence à passer qu'un peu après l'attaque du rochet par le cliquet.

page 50). Pour diminuer l'énergie absorbée par la commande de ce contact, on est amené à le placer tout près de la suspension, ce qui a pour effet de rendre un peu incertains les points de fermeture et de rupture ; et pour que malgré cela l'impulsion électromagnétique reste bien déterminée, on fera correspondre à ces points là (Ato), dans le cas d'une amplitude normale, une position de la bobine pour laquelle le couple est nul, $\frac{d\varphi}{d\theta} = 0$ (fig. 50).

Mais alors, pour des amplitudes plus grandes, on gaspillerait du courant en pure perte ; d'où nécessité d'un amortissement supplémentaire n'entrant en jeu que pour des amplitudes exa-

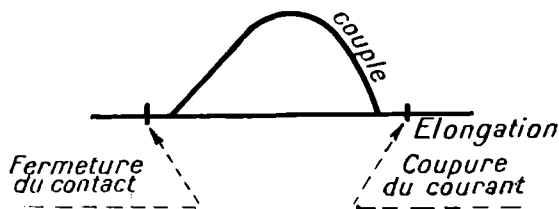


Fig. 50.

gérées et sans action sur la période, en particulier de courants de Foucault (page 15). Comme d'ailleurs, pour avoir une puissance réglante suffisante, on est conduit à donner à l'amplitude normale une valeur assez élevée, un correcteur d'isochronisme est indispensable (butées élastiques, page 12).

6° Solution Brillié, etc. — La solution adoptée par d'autres constructeurs (Brillié, Garnier, etc.) est théoriquement meilleure, mais moins générale que les précédentes, car elle élimine une cause importante de variations, la pile, en alimentant la pendule par un élément à tension constante type Latimer Clark.

Elle consiste à donner à la bobine et à l'aimant de grandes dimensions et à diminuer le couple résistant, de manière à obtenir pour l'amplitude normale une force contre-électromotrice e à peine inférieure à la tension U de la pile. Si donc, pour une raison quelconque, diminution du couple résistant par exemple,

l'amplitude et par conséquent la force contre-électromotrice e tendent à augmenter, la formule

$$i = \frac{U - e}{R}$$

montre que l'intensité s'annule aussitôt et le couple moteur en même temps ; par contre, si l'amplitude tendait à diminuer, le couple moteur augmenterait rapidement pour rétablir l'amplitude primitive.

23. Influence de la tension. — La tension de la pile d'alimentation diminue avec le temps. Si nous connaissions la loi suivant laquelle varient avec la vitesse les différents couples résistants, il nous serait facile de calculer l'influence qu'exercent sur l'amplitude et sur la marche les variations de tension, et peut-être d'y remédier partiellement. Malheureusement nos connaissances expérimentales ne sont pas suffisamment avancées pour cela et nous en sommes réduits à enregistrer ces perturbations sans pouvoir les prédéterminer.

Voici par exemple quelques résultats relatifs à trois pendules de types différents ; on voit qu'ils sont loin d'être identiques.

PENDULE X

Tension en volts	0,55	0,75	1	1,25	1,5	1,75
Amplitude en degrés ..	6°	6°20	6°45	7°30	8°15	9°

PENDULE Y

Tension en volts	0,8	1	1,25	1,5	1,75
Amplitude en degrés ..	2°10	3°	3°55	4°50	5°40

PENDULETTE Y

Tension en volts	0,70	0,75	1	1,25	1,50	1,75
Amplitude en degrés ..	4°10	5°30	8°	9°45	11°20	12°50

DEUXIÈME PARTIE

HORLOGES A ÉLASTICITÉ

CHAPITRE III

HORLOGES A BALANCIER CIRCULAIRE

Au lieu d'être emprunté à la pesanteur, le couple qui rappelle un balancier vers sa position d'équilibre peut provenir de la déformation d'un corps élastique. Nous examinerons d'abord le cas où la masse et l'élasticité du système oscillant sont localisées dans deux organes distincts (balancier et spiral), remettant à plus tard l'étude des verges vibrantes (diapasons et quartz).

I. — SYSTÈME BALANCIER-SPIRAL

24. Conditions d'isochronisme. — Le système oscillant que nous nous proposons d'étudier comporte un balancier circulaire maintenu par des pivots et un ressort spiral ; nous lui adjoindrons plus tard un dispositif d'entretien.

Voyons dans quelles conditions ses oscillations sont isochrones.

Rappelons tout d'abord qu'en un point d'un ressort de forme quelconque le couple de flexion est indépendant de la courbure initiale de la lame flexible ; il ne dépend que de la variation de cette courbure et lui est proportionnel. Si donc, lorsqu'un spiral se déforme, les variations de courbure sont les mêmes en tous points, le couple est constant tout le long du ressort, l'angle de

rotation des tangentes aux points extrêmes lui est proportionnel et les oscillations sont isochrones.

Encastrons donc dans une virole susceptible de tourner autour d'un axe fixe O l'extrémité intérieure d'un ressort dont la forme naturelle OA est une spirale d'Archimède (fig. 51) ; puis tout en

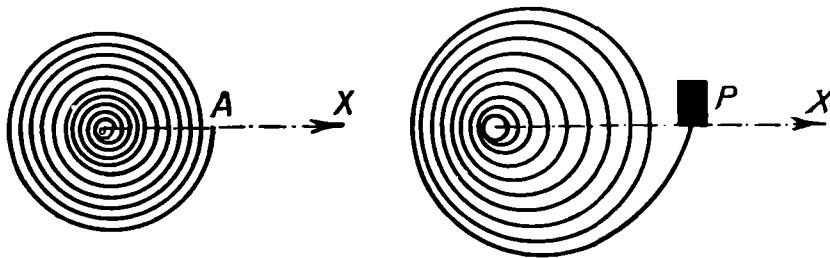


Fig. 51 et 53.

maintenant dans une direction fixe OX son autre extrémité A, déformons ce spiral en augmentant en tous ses points d'une même quantité sa courbure initiale (fig. 52) la virole tourne et le couple élastique est rigoureusement proportionnel à sa rotation.

Mais en même temps, l'extrémité A se rapproche de l'axe O

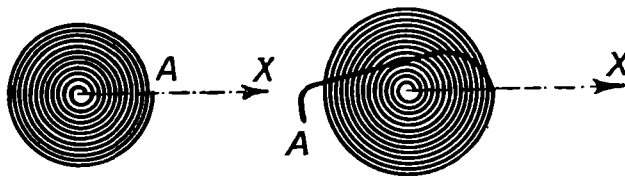


Fig. 52-54.

et la tangente en A change de direction. Conséquence : si par construction cette extrémité est *directement* encastrée dans un piton fixe P le spiral ne peut pas se développer concentriquement (fig. 53), les variations de courbure ne sont pas les mêmes en tous les points et le couple n'est plus proportionnel à la rotation de la virole ; c'est ce qui se produit dans les mécanismes bon marché.

Pour que le couple reste proportionnel à l'angle de rotation,

il faut que pendant celle-ci l'extrémité A ne reste pas fixe, mais se déplace suivant une loi convenable. Dans les mécanismes de précision, on obtient ce résultat en modifiant au préalable, suivant des règles que le calcul permet d'établir, la forme du ressort au voisinage du point d'encastrement ; c'est ce qu'on appelle munir le spiral de « courbes terminales » (fig. 54). Un système balancier-spiral muni de telles courbes bien établies effectue des oscillations isochrones quelle que soit l'amplitude du mouvement (dans les limites normales) ; naturellement l'isochronisme ainsi obtenu est celui du système complètement libre qu'il ne faut pas confondre avec celui du système entretenu.

25. Réglage. — Soient I le moment d'inertie du balancier, E le module d'élasticité du spiral, L sa longueur, h sa hauteur (comptée perpendiculairement au plan de la figure), e son épaisseur. On sait que la période des oscillations infiniment petites est :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{C}} \quad \text{avec} \quad C = \frac{Ehe^3}{12L}.$$

Pour faire varier là période d'oscillation, on peut donc agir d'abord sur le moment d'inertie I du balancier, puis, pour terminer le réglage, sur le couple C du spiral.

La modification de I se fait d'une manière discontinue soit en changeant le balancier, soit en lui ajoutant de petites surcharges (vis) ; la variation de C est obtenue au contraire d'une manière continue au moyen

d'une « raquette » ; c'est une pièce plate (fig. 55), mobile à frottement dur autour d'un axe qui se trouve dans le prolongement de celui du balancier, et qui porte deux goupilles très rapprochées entre lesquelles passe le spiral ; en faisant tourner cette raquette on modifie la longueur utile L du spiral et celle-ci peut

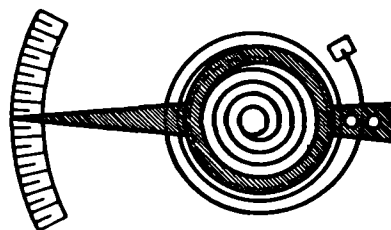


Fig. 55.

être repérée pour faciliter le réglage par une aiguille se déplaçant devant un cercle gradué.

Il est difficile de calculer exactement l'influence du déplacement de la raquette sur la marche de la pendulette, car cette manœuvre modifie la longueur des courbes terminales et surtout parce que l'encastrement du ressort dans les goupilles est loin d'être parfait. Mais on peut se faire une idée de l'ordre de grandeur du déplacement nécessaire pour faire varier la marche de 1 seconde par jour.

Le couple de rappel étant inversement proportionnel à la longueur L on a en effet $\frac{dT}{T} = \frac{1}{2} \frac{dL}{L}$ qui montre que pour obtenir une telle avance il faut raccourcir le ressort de la $2/86.400^e$ partie de sa longueur, soit, pour un spiral de 20 centimètres, de 5μ seulement. Inutile de dire que dans les pendulettes ordinaires la raquette ne permet pas une telle précision.

26. Echappement. — Théoriquement, l'échappement employé pour un balancier pendulaire (page 41) pourrait convenir à un balancier circulaire. Pratiquement les conditions d'amplitude sont tellement différentes, l'angle d'écart maximum étant de 2^o ou 3^o dans le premier cas et pouvant dépasser une demi-circonférence dans le second, qu'il devient indispensable d'y apporter quelques modifications ; en particulier il conviendra, dans le cas du balancier circulaire, tant pour diminuer les pertes par frottement que pour conserver un bon isochronisme, de laisser celui-ci osciller librement pendant la presque totalité de sa course et de ne le mettre en rapport avec l'échappement que pendant un temps très court au voisinage de la position d'équilibre ; on réalise ainsi ce que l'on appelle un « échappement libre » par opposition à l'échappement à repos décrit page 41.

Décrivons un échappement libre : le spiral S est fixé d'une part au piton fixe P , d'autre part à la virole V du balancier. Celui-ci porte un goujon G qui, dans la position d'équilibre, pénètre librement entre les dents D et D' de la fourchette F . Cette fourchette est solidaire de l'ancre A dont les becs B et B'

de profil convenable empêchent à tour de rôle la rotation continue de la roue d'échappement R sous l'influence d'un ressort de barillet.

1^o Montrons d'abord comment se système agit comme compteur d'oscillations.

Le goujon qui se meut librement dans le sens de la flèche entre librement dans la fourchette et pousse la dent D, faisant tourner l'ancre et éloignant le bec B de la dent *d*. La roue d'échappement R momentanément libérée avance jusqu'à ce que la dent *d'* rencontre le bec B'. Grâce à l'inclinaison prise alors par la fourchette, le goujon s'en échappe de lui-même et le balancier continue librement son oscillation sans aucune liaison avec l'échappement.

Au retour, le goujon retrouve la fourchette dans la position où il l'a laissée et entrant librement dans celle-ci pousse la dent D', fait tourner l'ancre et libère la dent *d'* du bec B' qui la retenait ; la roue d'échappement avance encore d'une dent, et ainsi de suite.

2^o Il faut également entretenir le mouvement du balancier ; rien de plus facile ; comme pour l'échappement décrit à la page 43 on munit les becs B et B' d'inclinés de sorte que dès que la roue est libérée et pendant tout son mouvement la dent en prise pousse le bec correspondant qui transmet l'action au goujon.

A chaque demi-oscillation le balancier est donc soumis à deux impulsions ; la première qui a lieu lorsque le goujon vient buter sur la dent D est retardatrice et sert à déclancher le mouvement de l'ancre ; la seconde qui se produit au moment où la dent D'

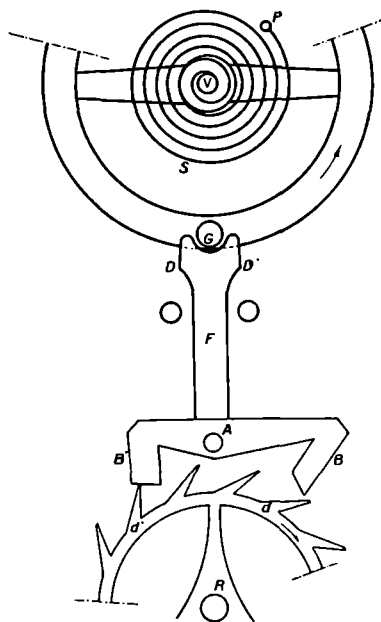


Fig. 56.

vient rattraper le goujon est au contraire motrice et apporte au balancier de l'énergie empruntée au ressort de barillet. Comme nous l'avons déjà fait remarquer, ces impulsions successives et de sens inverse ayant lieu en dehors de la position d'équilibre modifient la période des oscillations.

27. Action de la température. — Les variations de température influent sur la période du système balancier-spiral, en agissant à la fois sur :

Le rayon de giration ρ du balancier.

Les dimensions du spiral.

Le module d'élasticité du spiral.

1^o Ordre de grandeur. — Evaluons successivement ces différentes perturbations.

a) *Rayon de giration.* — La formule $T = 2\pi \sqrt{\frac{m\rho^2}{C}}$ devient en prenant les logarithmes, puis en différentiant :

$$\frac{dT}{T} = \frac{d\rho}{\rho} = \alpha t$$

en désignant par α le coefficient de dilatation du balancier. Ainsi pour chaque degré d'échauffement, la dilatation du balancier produit un retard relatif égal à α , soit, pour un balancier en acier ($\alpha = 11 \cdot 10^{-6}$), un retard de :

$$86.400 \times 11 \cdot 10^{-6} = 1 \text{ seconde par jour environ.}$$

b) *Dimensions du spiral.* — Des formules

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{C}} \quad \text{et} \quad C = \frac{1}{12} \frac{E h e^3}{L}$$

(E = module d'élasticité; h , e , L = hauteur, épaisseur et longueur du spiral) nous tirons, en supposant E constant :

$$\frac{dT}{T} = \frac{1}{2} \left(\frac{dL}{L} - \frac{dh}{h} - 3 \frac{de}{e} \right).$$

Désignons par β le coefficient de dilatation du spiral supposé identique suivant ses trois dimensions ; nous avons :

$$\frac{dL}{L} = \frac{dh}{h} = \frac{de}{e} = \beta t,$$

d'où

$$\frac{dT}{T} = -\frac{3}{2} \beta t.$$

Donc, pour chaque degré d'échauffement, la dilatation du spiral produit une avance relative égale à $\frac{3}{2} \beta$; c'est-à-dire pour un spiral en acier ($\beta = 11 \cdot 10^{-6}$) une avance de

$$86.400 \times \frac{3}{2} \times 11 \cdot 10^{-6} = 1,5 \text{ seconde par jour.}$$

Cette avance est partiellement compensée par le retard précédent dû à la dilatation du balancier,

c) *Module d'élasticité.* — Supposons, pour fixer les idées, que la diminution du module d'élasticité est proportionnelle à l'échauffement et appelons γ le coefficient de proportionnalité correspondant.

Comme précédemment nous obtenons la formule :

$$\frac{dT}{T} = \frac{1}{2} \gamma t$$

et nous voyons que la diminution d'élasticité correspondant à un échauffement de 1 degré produit un retard relatif égal à $\frac{\gamma}{2}$, soit, pour l'acier ($\gamma = 250 \cdot 10^{-6}$ environ), un retard journalier de $86.400 \times \frac{250}{2} \cdot 10^{-6} = 11$ secondes environ, ce qui est absolument inacceptable pour une pendulette de quelque valeur.

2° **Compensation.** — Une compensation s'impose donc dès que l'on veut obtenir quelque précision ; on l'obtient comme nous

allons le voir, soit en rendant C indépendant de la température, soit en laissant varier C , mais en faisant varier I dans les mêmes proportions.

a) *Emploi de l'élinvar.* — Les aciers au nickel ont des propriétés thermoélastiques très intéressantes, dépendant de leur composition et des traitements thermiques qu'ils ont subis. En particulier, on peut fabriquer un alliage, « l'élinvar », à 45 p. 100 de nickel dont le module d'élasticité est pratiquement indépendant

de la température, dans les conditions normales d'emploi.

L'emploi de l'élinvar ne laisse donc subsister que les faibles perturbations dues à la dilatation des métaux ; on pourrait même, en utilisant pour le spiral un alliage de composition légèrement différente (dont le module d'élasticité augmenterait avec la température) et pour le balancier un métal

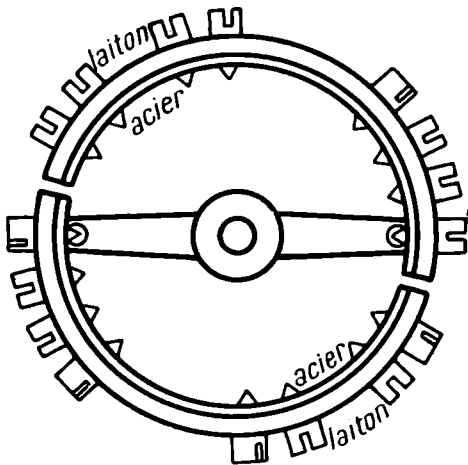


Fig. 57.

convenable, obtenir une compensation rigoureuse. Mais l'élinvar présente l'inconvénient d'être peu stable ; les spiraux obtenus ne sont pas tous absolument identiques et en outre leurs propriétés peuvent varier avec le temps. Aussi son emploi est-il réservé pour les pendulettes de qualité moyenne.

b) *Balancier bimétallique.* — Par suite de la stabilité de l'acier, son emploi s'impose pour la construction des spiraux utilisés dans les chronomètres de précision. Mais alors, lorsque la température augmente, pour compenser la diminution considérable du module d'élasticité, il est indispensable de faire décroître dans la même proportion le moment d'inertie du balancier ; ce résultat est obtenu simplement par l'emploi du « balancier bimétallique

coupé ». Ce balancier comporte (fig. 57) comme serge (jante) une bilame (acier en dedans, laiton en dehors) fendue au voisinage des bras. Lorsque la température augmente cette bilame s'infléchit vers l'intérieur, ce qui diminue le moment d'inertie.

Pour faciliter le réglage simultané de la période et de la compensation, il est avantageux de pouvoir modifier indépendamment le moment d'inertie à la température ordinaire et ses variations en fonction de la température. On y parvient en ménageant dans la serge des trous dans lesquels on peut enfoncer des vis. En faisant varier le nombre des vis on agit sur le moment d'inertie à la température ordinaire ; en changeant les vis de place on peut régler la compensation, l'influence d'une vis sur celle-ci étant d'autant plus grande qu'elle est plus éloignée du bras.

L'identité de période réalisée à deux températures extrêmes, par exemple 0° et 30° , se maintient-elle pour toutes les températures intermédiaires ?

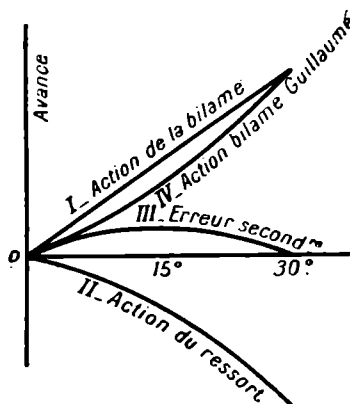


Fig. 58.

L'expérience montre qu'il n'en est rien pour le balancier précédent et qu'il existe pour la température de 15° une avance qui peut atteindre 2 ou 3 secondes par jour. Cette « erreur secondaire » provient de ce que le coefficient γ que nous avons supposé constant ne l'est pas en réalité, le module d'élasticité ne variant pas suivant une loi linéaire en fonction de la température. La figure 58 montre comment varie dans ces conditions la marche de la pendule en fonction de la température.

c) *Balancier Guillaume*. — Comment supprimer cette erreur secondaire ? Evidemment en amenant les courbes I et II de la figure précédente à être symétriques par rapport à l'axe des températures. L'acier s'imposant pour les spiraux, on n'a d'autre ressource que de choisir une bilame donnant une courbe ana-

logue à la courbe IV; on obtient pratiquement ce résultat en associant à une lame de laiton une lame d'acier à 41 p. 100 de nickel (1) dont la dilatation n'est pas linéaire et croît moins vite que la température.

II. — MOTEURS DE REMONTAGE

28. Difficultés de l'entretien direct. — Nous avons examiné au chapitre II les différentes manières d'équiper électriquement une horloge à gravité. Une discussion analogue s'impose pour les mécanismes à balancier circulaire et spiral réglant. Adopterons-nous l'entretien direct (par aimant et bobine) ou simplement le remontage automatique ? quel genre de moteur emploierons-nous ?

Les pendulettes à entretien direct et à balancier circulaire ont déjà fait l'objet de nombreuses recherches, mais presque toutes les tentatives d'exploitation industrielle ont finalement abouti à un échec ; la raison profonde en est, à notre avis, la suivante :

Pour réduire suffisamment les frottements et éviter la rupture des pivots sous l'influence de chocs ou de brusques accélérations, on est conduit à adopter des balanciers très légers, d'un poids voisin du gramme ; la pratique horlogère montre qu'en effet on n'a aucun intérêt à augmenter le poids du balancier, ce qui obligerait à augmenter également la grosseur des pivots et par suite les frottements. Mais alors, si le balancier est très léger, il est impossible de le munir d'un aimant puissant, le rendement électrique devient faible, les contacts défectueux et la pile s'use très rapidement.

Nous n'avons pas rencontré cet inconvénient pour un pendule à gravité ; moyennant l'emploi de lames flexibles, on pouvait donner au balancier un poids considérable sans exagérer les pertes d'énergie dans la suspension ; dans les mécanismes à balancier circulaire, l'amortissement considérable dû aux pivots

(1) En réalité l'invar et l'élinvar employés aujourd'hui sont des alliages plus complexes.

nous conduit au contraire à renoncer purement et simplement à l'entretien direct.

Nous emploierons donc des pendules mécaniques à remontage électrique ; avec quels moteurs, avec quelles sources d'énergie allons-nous les équiper ?

Nous ne pouvons pas employer de petites piles sèches comme pour les pendules type Féry ; la consommation de nos électros de remontage étant trop considérable, ces piles seraient insuffisantes. Pas davantage une batterie de piles à liquides comme pour les pendules astronomiques à remontage ; leur encombrement et leur entretien présenteraient trop d'inconvénients. Restent : les accumulateurs, le secteur continu et le secteur alternatif.

29. Electro-aimants. — *a)* L'alimentation par accumulateurs est tout indiquée sur les automobiles, où la batterie, en raison même de ses multiples fonctions, est toujours maintenue en bon état. Le moteur de remontage est un petit électro-aimant ; pas de réserve de marche à prévoir.

b) Sur le secteur continu 110 ou 220 volts, nous ne pouvons pas tolérer des moteurs de type industriel que la présence de collecteurs et de balais rend trop délicats ; il nous faut donc encore employer des électro-aimants. Mais la réalisation sera rendue plus compliquée que pour les montres d'automobile par suite de la nécessité de prévoir :

Une réserve de marche importante.

Un interrupteur résistant aux arcs de rupture.

Un dispositif de sécurité.

La réserve de marche doit être importante, trente-six heures par exemple, de nombreux usagers ayant l'habitude, lorsqu'ils s'absentent les jours de fête, de couper le courant au compteur ; la pendulette doit être en conséquence munie d'un fort ressort de barillet et de deux séries de trains d'engrenages, l'un multiplicateur, l'autre démultiplicateur.

Le courant absorbé n'est pas négligeable, et sous 110 volts

il fournit à la rupture un arc susceptible de détériorer rapidement les interrupteurs établis sans précautions ; à ce point de vue l'utilisation d'interrupteurs à mercure, où la coupure se fait dans un gaz inerte, constitue un progrès sensible.

Enfin, le courant ne passe normalement dans la bobine de l'électro que pendant les courts instants nécessaires au remontage. Mais, il peut arriver accidentellement que par suite du blocage de l'interrupteur le courant soit maintenu en permanence et grille la bobine qui n'est calculée que pour un service intermittent (1) ; aussi protège-t-on le circuit par un relais thermique généralement constitué par une petite bilame chauffée par le courant et qui, lorsque la durée de celui-ci est exagérée, ouvre un contact auxiliaire.

c) Sur le secteur alternatif à 110 volts, les électro-aimants, qui fonctionnent d'ailleurs moins bien qu'en courant continu, ont été généralement remplacés au cours de ces dernières années par de petits moteurs à champ tournant dépourvus de balais. Avant d'aborder l'étude de ceux-ci, nous reviendrons cependant un peu sur les propriétés des électro-aimants pour montrer comment doivent être modifiées en courant alternatif nos conclusions de la page 37.

Quelle que soit la forme du courant, pourvu que le fer soit loin de la saturation, l'attraction est à chaque instant proportionnelle au carré de l'intensité ; en courant alternatif elle s'anule donc deux fois par période, et sa valeur moyenne est proportionnelle à la moyenne du carré de l'intensité, c'est-à-dire au carré de l'intensité efficace.

Lorsque l'alimentation a lieu à tension constante, l'intensité diminue pendant le fonctionnement de l'électro, mais le phénomène n'est plus le même qu'en courant continu : cet affaiblissement qui est dû à l'augmentation de la self-inductance persiste après arrêt de l'armature. Un même électro ne donnera donc pas

(1) Dans une pendulette de ce type, la consommation moyenne est normalement de 0,2 watt ; elle atteint 25 watts lorsqu'on maintient constamment l'électro en service.

sous tension continue et sous tension alternative la même loi d'attraction.

Reprenons en particulier l'électro-aimant à fer à cheval de la page 37, en supposant négligeables la résistance de la bobine et la réluctance du fer. Nous avons, en adoptant les mêmes notations :

$$I = \frac{U}{L\omega} \quad L = \frac{2\pi n^2 S}{x} \quad \frac{d\mathcal{E}}{dx} = \frac{S}{x^2}$$

d'où

$$F = \frac{U^2}{2\pi n^2 S\omega}.$$

Ainsi la force attractive, au lieu de varier en raison inverse de la distance, en est, dans la limite de nos hypothèses, pratiquement indépendante.

Dans les électros à armature tournante et à entrefer constant, le couple diminue au contraire pendant l'attraction.

30. Moteurs asynchrones à stator monophasé. — La plupart des moteurs asynchrones industriels sont alimentés en triphasé ; on obtient ainsi facilement au moyen de trois bobines disposées à 120° un champ tournant capable de développer dans un rotor cylindrique un couple moteur important. Malgré leur excellent rendement, ces moteurs sont, faute de canalisations à trois fils, inutilisables en horlogerie ; aussi a-t-il fallu imaginer, en vue de cette application, des moteurs spéciaux marchant en monophasé et munis d'un dispositif simple de déphasage.

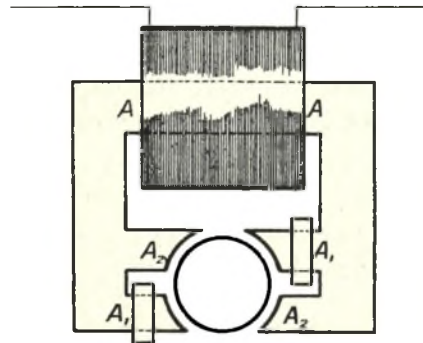


Fig. 59.

Le stator de ces moteurs est généralement constitué par un circuit magnétique à entrefer (fig. 59) portant une bobine magné-

tisante et, sur une portion des tôles seulement, une bague en court-circuit. Les courants induits qui prennent naissance dans cette bague ont pour effet de réduire et de déphaser le flux qui la traverse ; la dissymétrie qui en résulte dans l'entrefer est utilisée pour entraîner un rotor.

Pour mettre en évidence l'influence de ces courants de Foucault, nous avons exagéré sur un moteur de ce type les dimensions des bagues et fait quelques mesures magnétiques :

Le stator étant dépourvu de bagues, on a d'abord, au moyen de bobines exploratrices placées en A, en A_1 et en A_2 , déterminé le flux total Φ , le flux Φ_1 émis par le pôle P_1 et le flux Φ_2 émis par le pôle P_2 , on a trouvé, en maxwells :

$$\Phi = 9.850 \quad \Phi_1 = 3.190 \quad \Phi_2 = 3.230.$$

Les bagues ayant été remises en place, on a recommencé les mesures, en notant en outre les déphasages ψ , ψ_1 , ψ_2 , subis par les flux pendant cette opération, les résultats ont été nettement différents :

$$\begin{aligned} \Phi &= 9.400 & \Phi_1 &= 2.040 & \Phi_2 &= 4.100 \\ \psi &= -2^\circ & \psi_1 &= +35^\circ & \psi_2 &= -11^\circ. \end{aligned}$$

Ainsi, le flux total Φ n'a pas sensiblement varié (1) tandis que Φ_2 s'est augmenté aux dépens de Φ_1 , le déphasage relatif de Φ_1 et de Φ_2 , qui était nul lorsqu'il n'y avait pas de bague, est maintenant de l'ordre de 45° .

Dans la plupart des moteurs, l'influence des bagues est nettement plus petite. Φ_1 et Φ_2 restent sensiblement égaux et leur déphasage est d'une dizaine de degrés seulement.

31. Moteurs à disques. — Le stator que nous venons d'étudier est équipé avec des rotors de forme et de nature différentes ; les uns sont plans, d'autres cylindriques ; le couple d'entraînement est dû tantôt à des courants induits, tantôt à l'hystérésis. Nous

(1) La légère diminution de Φ et l'avance de phase sont dus à la résistance de la bobine.

allons passer en revue ces différentes sortes de rotors, en commençant par ceux qui affectent la forme d'un disque (fig. 60).

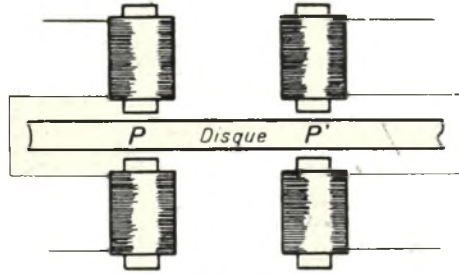


Fig. 60.

1^o **Théorie.** — Faisons agir normalement à la surface d'un disque de cuivre deux pôles P et P' produisant des champs alternatifs h et h' déphasés l'un par rapport à l'autre d'un angle φ et ayant, pour simplifier les notations, même amplitude ($H = H'$)

$$h = H \sin \omega t$$

$$h' = H \sin (\omega t - \varphi).$$

a) Le disque étant d'abord supposé immobile, chacun de ces pôles y crée par induction une nappe de courant qui l'entoure, ainsi qu'on l'a représenté sur la figure 61 en adoptant comme sens positif : pour les champs celui qui va d'arrière en avant, pour les courants celui qui est indiqué par une flèche.

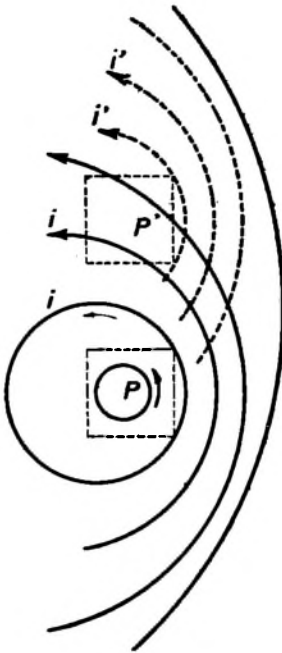


Fig. 61.

Plaçons-nous dans le cas où le disque est suffisamment mince (résistance élevée, constante de temps faible) pour que les courants induits soient peu importants et ne modifient pas sensiblement les champs inducteurs ; les forces électromotrices induites dans le

disque et par suite les intensités i , i' sont proportionnelles aux champs correspondants et déphasées sur eux de 90°

$$i = aH\omega \cos \omega t \quad i' = aH\omega \cos (\omega t - \varphi).$$

Pour calculer le couple moteur, représentons sur la figure 62 les vecteurs $HH'II'$ dont les projections sont $hh'ii'$. Chacun des champs H et H' agira sur les nappes de courant I et I' , le couple moyen correspondant à deux de ces vecteurs étant proportionnel à leur amplitude et au cosinus de leur déphasage relatif ; examinons donc l'une après l'autre ces différentes actions.

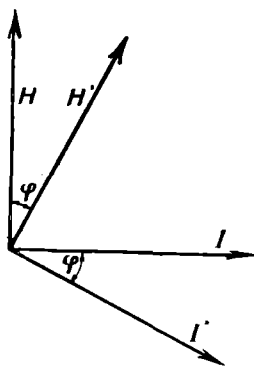


Fig. 62.

L'action de H sur I qui lui est perpendiculaire et celle de H' sur I' sont nulles en moyenne ; ainsi, chaque pôle

agissant sur les courants qu'il induit ne peut produire que des trépidations sans donner lieu à aucun couple actif.

Les actions de H' sur I et de H sur I' sont toutes deux proportionnelles à $H^2 \sin \varphi$; elles sont concordantes (en appliquant la règle des trois doigts, on remarquera que les portions utiles des nappes de courant circulent sous les pôles P et P' l'une de droite à gauche, l'autre de gauche à droite) et donnent naissance à un couple $C_m = AH^2\omega \sin \varphi$.

b) Laissons maintenant le disque tourner à la vitesse ω' . Le couple moteur précédent n'est pas modifié, mais il s'y superpose un couple résistant dû à la rotation du disque dans les champs non uniformes h et h' .

Toute la surface du disque située au-dessous des pôles est par suite du mouvement le siège

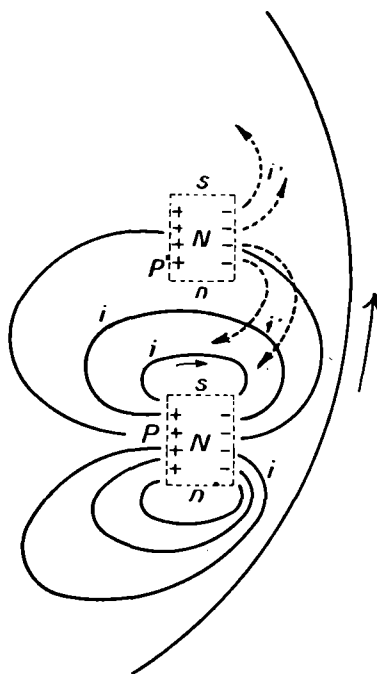


Fig. 63.

d'une force électromotrice dirigée, pour fixer les idées, de droite à gauche au moment où le pôle P est Nord ; les nappes de courant supplémentaires créées par la rotation du disque ont donc la forme indiquée sur la figure 63, ces courants créant des pôles induits n et s qui tendent à s'opposer au mouvement.

Le couple retardateur est facile à calculer ; les courants induits sont cette fois en phase avec le champ inducteur ; chaque pôle produira donc sur les courants qu'il induit un couple instantané proportionnel à $\omega' H^2 \sin \omega t \cos \omega t$ pour l'un et à $\omega' H^2 \sin (\omega t - \varphi) \cos (\omega t - \varphi)$ pour l'autre.

La moyenne de chaque couple n'est pas nulle et la somme pour les deux pôles peut se mettre sous la forme $C_r = B\omega' H^2$.

Chaque pôle agit aussi, quoique beaucoup plus faiblement, sur le courant induit par l'autre, mais il est aisé de voir que par symétrie ces couples supplémentaires égaux et de signes contraires se détruisent.

c) Pendant son mouvement le couple agissant sur le disque a donc pour expression :

$$C = C_m - C_r = H^2 (A\omega \sin \varphi - B\omega').$$

On voit que le couple de démarrage est proportionnel au sinus du déphasage φ et au carré de la tension d'alimentation. Le couple en marche est une fonction linéaire de la vitesse, la puissance une fonction du second degré (fig. 64). La vitesse à vide $\omega' = \frac{A}{B} \sin \varphi \cdot \omega$, indépendante de la tension, du moins tant que les frottements sont négligeables, peut être modifiée à volonté par réglage du déphasage φ , c'est-à-dire de la résistance des bagues.

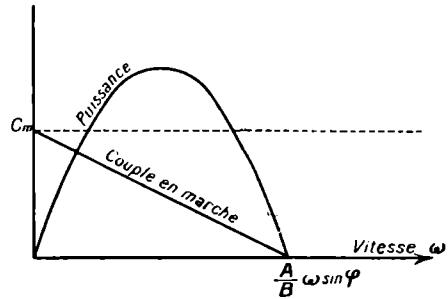


Fig. 64.

2° **Réalisation.** — Les moteurs que nous venons d'étudier sont d'un rendement ridiculement faible ; aussi sont-ils relativement encombrants malgré l'extrême petitesse de la puissance que demande le fonctionnement d'une pendule. A titre d'exemple, nous citerons deux moteurs de caractéristiques bien différentes, destinés l'un à des cadrans d'assez grandes dimensions, l'autre à des pendulettes de bureau.

a) MOTEUR LEPAUTE

Caractéristiques électriques.

Intensité absorbée sous 115 volts : 0,062 ampère.

Déphasage de l'intensité sur la tension : 72°.

Puissance consommée : 2,1 watts.

Caractéristiques mécaniques.

Couple gr./cm.	Vitesse en t./s.	Puissance en milliwatts	Rendement
0	3,3	0	0
0,4	2,5	0,63	0,030 p. 100
1,05	1,9	1,25	0,060 p. 100
1,5	1,5	1,40	0,067 p. 100
2,1	0,82	1,07	0,051 p. 100
2,5	0,23	0,36	0,017 p. 100

b) MOTEUR COTTNA

Caractéristiques électriques.

Intensité absorbée sous 110 volts : 0,022 ampère.

Déphasage de l'intensité sur la tension : 41°.

Puissance consommée : 1,9 watt,

Caractéristiques mécaniques.

Tension en volts	Couple en gr./cm.	Vitesse en t./s.	Puissance en milliwatts	Rendement
100	0	3	0	
»	0,06	1,8	0,068	
»	0,125	1,1	0,086	
»	0,19	0,4	0,15	
115	0	3,3	0	0
»	0,06	2,6	0,098	0,0052 p. 100
»	0,125	2	0,155	0,008 p. 100
»	0,19	1,6	0,19	0,01 p. 100
»	0,25	0,8	0,125	0,0065 p. 100
135	0	4,1	0	
»	0,06	3	0,11	
»	0,125	2,5	0,195	
»	0,19	1,9	0,225	
»	0,25	1,4	0,22	

On remarquera sur le tableau précédent que la puissance est fortement influencée par les variations de voltage.

32. Moteurs à rotor cylindrique. — La méthode de calcul utilisée dans le paragraphe précédent pour les rotors à disque peut encore être utilisée pour les rotors cylindriques (fig. 59) ; mais pour ceux-ci on arrive plus rapidement au résultat en utilisant la notion de champ tournant.

1^o Théorie. — Faisons agir en un point O deux champs alternatifs perpendiculaires (1) de même amplitude, mais déphasés d'un angle φ

$$h = H \sin \omega t \quad h' = H \sin (\omega t - \varphi).$$

Nous pouvons considérer chacun de ces champs comme la résultante de deux champs d'amplitude $\frac{H}{2}$ tournant en sens

(1) En pratique cet angle est un peu inférieur à 90°, mais cela ne change en rien les conclusions ; la généralisation est d'ailleurs immédiate et ne présente aucune difficulté.

inverse ; sur la figure 65 qui correspond au temps $t = 0$, les

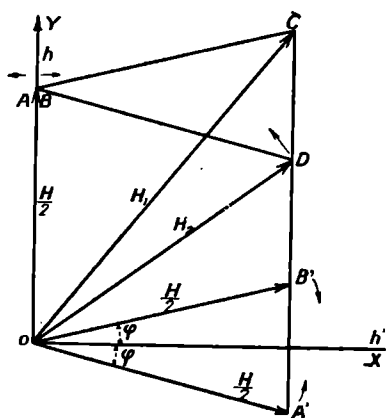


Fig. 65.

deux vecteurs OA et OB qui représentent le champ h sont momentanément confondus suivant OY, tandis que les vecteurs OA' et OB' représentant h' font chacun avec OX un angle φ .

Mais nous pouvons maintenant remplacer les champs OB et OB' qui tournent dans le même sens par leur résultante $H_1 = OC$ et les champs OA et OA' qui tournent tous deux en sens inverse par leur résultante $H_2 = OD$. Les champs H_1 et H_2

s'évaluent facilement dans les triangles OAC et OAD

$$H_1^2 = \frac{H^2}{2} (1 + \sin \varphi) \quad H_2^2 = \frac{H^2}{2} (1 - \sin \varphi).$$

Plaçons en O un rotor cylindrique de nature convenable ; il sera sollicité en sens inverse par les champs H_1 et H_2 et finalement sera entraîné par le plus fort H_1 avec une vitesse ω' . Cette vitesse dépend de la nature du rotor.

a) Supposons d'abord le rotor constitué par un tube de cuivre de faible épaisseur sans noyau de fer ; sa réactance $L\omega$ étant négligeable devant sa résistance R l'introduction de ce rotor n'a pas modifié la valeur des champs tournants H_1 et H_2 ; l'entraînement se faisant par courants de Foucault, le couple dû à chacun de ces champs est proportionnel au carré de son amplitude, et la fréquence du courant qu'il induit. Le couple résultant a donc pour expression :

$$\begin{aligned} C &= KH_1^2(\omega - \omega') - KH_2^2(\omega + \omega') \\ &= K\omega(H_1^2 - H_2^2) - K\omega'(H_1^2 + H_2^2) \end{aligned}$$

ou en faisant réapparaître les champs primitifs :

$$C = KH^2(\omega \sin \varphi - \omega').$$

Ce résultat est analogue à celui que nous avons obtenu pour les rotors à disque : le couple est maximum au démarrage, la vitesse à vide

$$\omega' = \omega \sin \varphi$$

peut être réglée à volonté par simple modification du déphasage φ .

b) Supposons que le rotor soit une véritable cage d'écureuil, contenant du fer et du cuivre en quantité importante, possédant par suite une faible résistance et une self importante. Les formules générales sont encore applicables, mais à condition d'appeler H_1 et H_2 les champs modifiés par les ampère-tours induits qui ne sont plus négligeables devant les ampère-tours inducteurs.

Il est facile d'ailleurs de voir dans quel sens a lieu cette modification. Au moment du démarrage les deux champs H_1 et H_2 sont fortement réduits et dans la même proportion, la réactance $L\omega$ du rotor étant la même pour tous les deux ; le couple est faible.

A mesure que la vitesse augmente, le champ H_2 , dont la vitesse relative par rapport au disque est $\omega + \omega'$, est plus fortement affecté que le champ H_1 dont la vitesse relative n'est que $\omega - \omega'$, le couple augmente donc, puis, après être passé par un maximum, il diminue finalement à cause du facteur $\omega - \omega'$. Au voisinage du synchronisme, le champ H_2 étant complètement étouffé par le rotor qui joue pour lui le rôle d'écran, tandis que le champ H_1 passe librement, le couple a pour expression :

$$C = KH_1^2(\omega - \omega') = KH^2(\omega - \omega') \frac{1 + \sin \varphi}{2}.$$

La vitesse à vide est donc celle du synchronisme.

c) Constituons enfin un rotor en empilant les unes sur les autres des rondelles d'acier à aimant. Chaque champ tournant produira sur ce rotor un couple d'hystérésis proportionnel au carré de son amplitude et indépendant de la vitesse ω' du moins tant que celle-ci est inférieure à ω .

Le couple moteur dû à l'ensemble des deux champs H_1 et H_2 a donc pour valeur :

$$C = K(H_1^2 - H_2^2) = KH^2 \sin \varphi.$$

La vitesse à vide est égale à ω .

2° **Réalisation.** — a) MOTEUR LIP (à cage d'écureuil).

Caractéristiques électriques.

Intensité absorbée sous 115 volts : 0,035 ampère.

Déphasage du courant sur la tension : 62°.

Puissance consommée : 1,8 watt.

Caractéristiques mécaniques.

Couple en gr./cm.	Vitesse en t./s.	Puissance en milliwatts	Rendement
0	24	0	0
0,8	20	10	0,55 p. 100
1,6	16,6	16	0,9 p. 100
2,4	14	21	1,15 p. 100
3,2	10	20	1,1 p. 100

Si l'on ne tient compte que du rendement, on voit que ce type de moteur est bien supérieur au moteur à disque. Toutefois, à côté de cet avantage incontestable, il présente deux inconvénients assez sérieux :

Sa vitesse est élevée, d'où nécessité d'augmenter le nombre des mobiles dans le rouage démultiplicateur.

La présence d'encoches à la périphérie du rotor fait varier périodiquement la réluctance du circuit magnétique ; il en résulte une attraction magnétique constamment variable, dépassant souvent le poids du rotor et entraînant en même temps que des vibrations l'usure prématurée des pivots.

b) MOTEUR DEP (à hystérésis et courants de Foucault) :

Caractéristiques électriques.

Intensité absorbée sous 115 volts : 0,02 amp.

Déphasage du courant sur la tension : 63°.

Puissance consommée : 1,1 watt.

Caractéristiques mécaniques.

Couple gr./cm.	Vitesse en t./s.	Puissance en milliwatts	Rendement
0	35	0	0
0,16	35	3,5	0,32 p. 100
0,4	31	7,7	0,7 p. 100
0,6	27	9,3	0,85 p. 100
0,8	0	0	0

Comme le précédent, ce moteur a une vitesse et un rendement nettement plus élevés que les moteurs à disque ; le rotor ne comportant aucune encoche, il ne peut se produire d'attraction magnétique parasite qu'en cas de décentrage excessif.

REMARQUE. — Les moteurs précédents doivent être largement calculés, ne fût-ce que pour tenir compte de l'augmentation de frottements provenant d'un mauvais graissage ou de fluctuations possibles dans la tension d'alimentation ; le remontage s'effectue donc assez rapidement (5 heures par exemple pour une réserve de marche de 48 heures). Si l'action du moteur continuait ensuite, alors que le ressort de barillet est complètement bandé, on observerait soit la rupture de celui-ci, soit une marche irrégulière de l'échappement ; il faut donc prévoir un dispositif automatique assurant en fin de remontage soit la coupure du circuit électrique, soit le freinage du rotor. C'est cette dernière solution que l'on adopte généralement malgré l'augmentation de consommation qui en résulte parce qu'elle a l'avantage de supprimer tout risque de mauvais contact.

La figure 66 indique comment est assuré au moment voulu le blocage du disque D. Pendant le remontage celui-ci transmet son mouvement au moyen d'une démultiplication à l'axe A du barillet, mais cet axe tourne plus vite que le barillet B auquel il

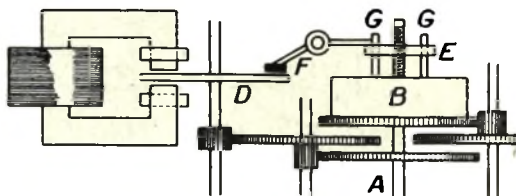


Fig. 66.

est relié par le ressort. Une extrémité de l'axe A est filetée et l'écrou E est guidé par les tiges G montées sur le barillet B. Il en résulte qu'au cours du remontage l'écrou E s'éloigne du barillet, tandis que le frein F se rapproche progressivement du disque D et finit par le freiner. Le ressort reste ainsi bandé en permanence et ne se détend que pendant les interruptions de courant.

CHAPITRE IV

HORLOGES A DIAPASONS ET A QUARTZ

I. — DIAPASONS

On emploie encore comme oscillateurs des verges vibrantes, diapasons pour les fréquences audibles et quartz pour les fréquences très élevées.

33. Entretien. — Un diapason est une verge vibrante à laquelle on a donné une forme un peu spéciale en vue de réduire les réactions sur le support ; ses deux branches identiques sont constamment animées de mouvements inverses en des oscillations de flexion.

Le calcul montre qu'il rend un son fondamental dont la fréquence est proportionnelle à l'épaisseur e (comptée dans le plan des branches) et en raison inverse du carré de la longueur l .

Pour de l'acier ordinaire on a par exemple : $f = 80.000 \frac{e}{l^2}$ c. g. s.

Outre ce son fondamental, un diapason peut rendre des sons supérieurs ; le premier de ceux-ci a une fréquence 6,25 fois plus grande que celle du son fondamental ; on a soin, dans les applications chronométriques, d'éviter sa formation, en choisissant convenablement le point d'excitation du diapason. Le second, dont la fréquence est 17,5 fois supérieure à celle du son fondamental, a généralement une amplitude négligeable.

Pour entretenir les vibrations d'un diapason, on fait le plus souvent appel à ses propriétés magnétiques.

1° Le dispositif le plus simple est le suivant :

Entre les deux branches B et B' du diapason (fig. 67) est fixé un électro-aimant E qui les attire lorsqu'il est excité par le courant de la pile P ; cette excitation a lieu tant que le disque en argent D reste en contact avec un fil F de platine porté par la branche B.

On en connaît la théorie élémentaire ; lorsqu'on ferme l'interrupteur, l'électro s'aimante et attire le diapason. Le contact est alors rompu, l'électro se désaimante et le diapason revient en

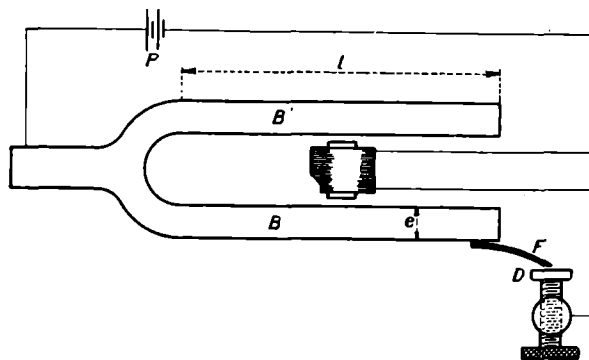


Fig. 67.

arrière en vertu de son élasticité ; dans ces conditions le contact se rétablit, le courant recommence à passer, et les mêmes phénomènes se reproduisent indéfiniment.

Mais il est aisé de voir qu'une telle théorie est insoutenable. Elle admet en effet que le courant, lorsqu'il est établi, a une valeur constante et que l'attraction magnétique ne dépend que de la position des branches du diapason ; s'il en était ainsi, on pourrait remplacer l'électro par un système de ressorts et de butées, et il est alors visible qu'aucune énergie ne pourrait être fournie au système oscillant. En fait, si les vibrations peuvent être entretenues, c'est parce que, pour une même position des branches du diapason, l'attraction est plus grande quand celles-ci se rapprochent de l'électro que lorsqu'elles s'en éloignent, c'est parce que plusieurs phénomènes que la théorie élémentaire

considérât comme instantanés ne s'établissent en réalité qu'avec un certain retard ; signalons en particulier les suivants :

A la fermeture, le circuit n'est pas fermé instantanément, car la résistance de contact ne devient négligeable que lorsque la pression exercée par le fil F sur le disque D est suffisante. A l'ouverture le fil F entraîné par sa force vive ne quitte le disque D qu'avec un certain retard.

La self-induction retarde l'établissement du courant, et le prolonge au contraire dans l'étincelle de rupture.

Enfin, à cause de l'hystérésis la force attractive est en retard sur le champ magnétisant.

Ce qui précède fera comprendre pourquoi les caractéristiques des bobinages employés doivent être appropriées à la période du diapason ; pour entretenir des vibrations de fréquence 10 par exemple, il faudra employer des bobines présentant une constante de temps beaucoup plus grande que pour la fréquence 1.000.

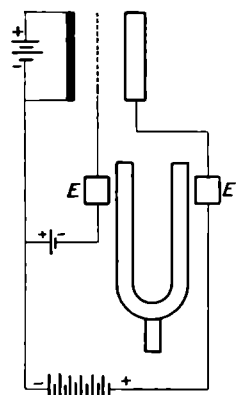


Fig. 68.

2° Le dispositif précédent est relativement instable et ne peut être utilisé que pour des expériences de courte durée. Dans les pendules électriques à diapason on doit renoncer, par suite des effets désastreux de l'étincelle, à toute rupture périodique d'un contact matériel. On est ainsi conduit à utiliser des triodes ; voici par exemple un dispositif souvent adopté (fig. 68) :

Deux petits électro-aimants polarisés EE', analogues à ceux que l'on rencontre dans les écouteurs téléphoniques, sont disposés en regard des extrémités. L'un des enroulements E est intercalé entre le filament et la grille d'une triode, l'autre E' dans le circuit plaque.

Dans le premier de ces enroulements, les vibrations de la branche correspondante du diapason induisent pendant le fonctionnement une tension alternative ; celle-ci, amplifiée par la triode,

donne naissance dans le deuxième enroulement à un courant qui a pour effet de modifier la force attractive exercée sur la deuxième branche. Si les connexions ont été faites dans le sens convenable, cette action du deuxième enroulement tend à entretenir le mouvement. On remarquera que pour des électros bien étudiés la force électro-motrice induite dans la première bobine est maxima en même temps que la vitesse de déplacement du diapason ; par

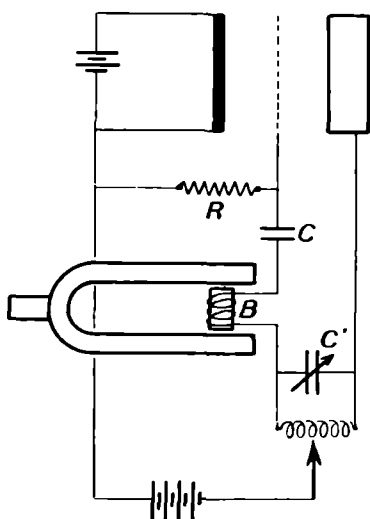


Fig. 69.

suite si l'impédance des bobines est nettement plus petite que la résistance de la triode, la force électromagnétique est sensiblement maxima lorsque le diapason passe par sa position d'équilibre, ce qui correspond aux conditions théoriques d'un bon entretien.

Au démarrage, il n'est même pas nécessaire, en pratique, de lancer le diapason à la main ; il entre en vibration dès qu'on met la triode en circuit et l'amplitude de son mouvement augmente peu à peu, pour se stabiliser finalement lorsque l'énergie

empruntée à la pile de tension-plaque compense exactement les pertes dues à l'amortissement.

3^o Enfin, on a utilisé également avec succès, le schéma de la fig. 69 (que nous retrouverons pour le quartz),

Entre les deux branches du diapason est placée une bobine B intercalée dans le circuit grille d'une triode ; le potentiel moyen de la grille est maintenu à une valeur convenable au moyen d'un condensateur d'arrêt C et d'une résistance de fuite R.

Lorsque par la manœuvre du condensateur C' on amène progressivement le circuit oscillant à l'unisson avec le diapason, on voit celui-ci se mettre en mouvement et l'on entend en même temps des battements qui s'espacent de plus en plus jusqu'au

moment où un accrochage brusque se produit ; le diapason dont l'amortissement est bien inférieur à celui du circuit oscillant impose alors sa fréquence propre à celui-ci et l'on peut dans ces conditions, sans provoquer le décrochage, faire varier dans d'assez larges limites la capacité C' .

34. Stabilité. — La fréquence du diapason est évidemment influencée par les constantes électriques des circuits d'entretien, mais l'expérience montre que, pour une triode de type donné, il faut modifier profondément les caractéristiques électriques de ces circuits pour que les variations correspondantes de fréquence soient appréciables ; pour fixer les idées, on peut compter en moyenne qu'on obtient une variation de fréquence de 3 millièmes en faisant varier la tension filament de 0,5 volt ou la tension plaque de 50 volts ; en pratique, à condition d'employer des batteries de capacité suffisante, il est aisé de rendre absolument négligeables ces variations.

Le circuit d'utilisation pourrait également apporter quelque trouble dans le fonctionnement du diapason s'il lui empruntait une énergie trop considérable ; aussi préfère-t-on généralement passer par l'intermédiaire d'une deuxième triode amplificatrice dont la grille est réunie à celle de la première et dans le circuit-plaque de laquelle on place les appareils d'utilisation.

Parmi les autres causes susceptibles de faire varier la fréquence, la plus importante est certainement la variation de température ; c'est ainsi qu'avec des diapasons en acier ordinaire, un échauffement de 1° produit une diminution relative de fréquence de l'ordre de 1 dix-millième. L'emploi d'appareils en élinvar a heureusement permis de diminuer beaucoup cette action perturbatrice (cinq millièmes environ par degré seulement) ; en plaçant ceux-ci dans une enceinte dont la température est maintenue constante à $1/10$ de degré près, ce qui ne présente aucune difficulté, on élimine toute variation appréciable.

Enfin, la pression et l'humidité peuvent avoir quelque influence. Une variation de pression de 1 millimètre de mercure entraîne une variation correspondante de l'ordre de quelques

dix-millionièmes. Quant à l'humidité, ses effets sont très mal connus et sont dus sans doute à un dépôt de rosée qui modifie à la fois l'amortissement et la masse des vibrateurs ; on supprime ces inconvénients en plaçant les appareils dans une atmosphère raréfiée et sèche.

35. Comparaison de deux diapasons. Courbes de Lissajoux. — Pour comparer la fréquence de deux diapasons on utilise

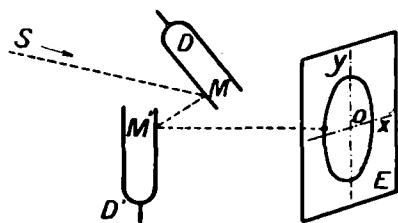


Fig. 70.

souvent la méthode optique de Lissajoux (fig. 70).

Fixons à l'un des diapasons D un petit miroir M et faisons tomber sur lui un faisceau lumineux SM ; celui-ci vient après réflexion former sur un écran E une petite tache lumineuse. Exci-

tons le diapason ; si ses vibrations s'effectuent dans un plan horizontal et avec une période T, la tache décrira sur l'écran une droite horizontale, son abscisse x étant de la forme

$$x = a \sin 2\pi \frac{t}{T}.$$

Remplaçons le diapason précédent par un autre D' de période T' vibrant dans un plan vertical ; la tache lumineuse décrit une droite verticale, son ordonnée étant de la forme :

$$y = b \sin \left(\frac{2\pi t}{T'} - \alpha \right).$$

Intercalons enfin sur le trajet des rayons lumineux les deux diapasons D et D' ; la tache lumineuse décrit cette fois une courbe dont l'équation s'obtient en éliminant t entre les relations précédentes.

1° Les deux diapasons ont la même période $T = T'$. L'élimination du temps donne :

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{2 \cos \alpha}{ab} xy = \sin^2 \alpha.$$

C'est l'équation d'une ellipse inscrite dans un rectangle de côtés $2a$ et $2b$. Son grand axe est situé dans les quadrants 1 et 3 si α est compris entre $-\frac{\pi}{2}$ et $+\frac{\pi}{2}$, dans les autres quadrants pour les autres valeurs de α ; elle est parcourue dans le sens des aiguilles d'une montre quand α est compris entre 0 et $\frac{\pi}{2}$ ou entre π et $\frac{3\pi}{2}$, en sens inverse pour les autres valeurs de α .

Cas particuliers : Si $\alpha = 0$, c'est-à-dire si les deux mouvements sont en phase, l'équation dégénère en :

$$bx = ay$$

et l'on a une droite.

Si $\alpha = 90^\circ$, c'est-à-dire si les deux mouvements sont en quadrature, l'équation devient :

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1,$$

la tache lumineuse parcourt alors en sens inverse des aiguilles d'une montre une ellipse rapportée à ses axes.

2° Les deux périodes sont très peu différentes. Dans ces conditions, tout se passe comme si α variait lentement ; on observe donc sur l'écran une ellipse qui se déforme lentement en passant par toutes les formes précédentes ; le sens de cette déformation et sa fréquence indiqueront quel est le diapason le plus rapide et de combien différent les fréquences des diapasons.

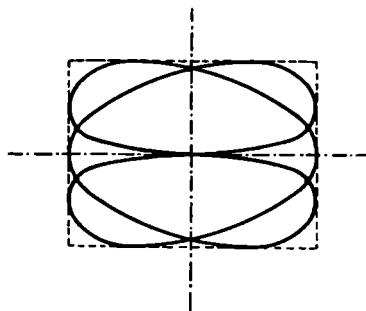


Fig. 71.

3° Les deux périodes sont très différentes, mais commensurables. La tache lumineuse décrit dans ces conditions une courbe fermée, de forme plus compliquée. Soit par exemple $2T = 3T'$; la trajectoire est parcourue complètement en un temps $2T = 3T'$; pendant ce temps là x atteint

deux fois les valeurs $+a$ et $-a$, y trois fois les valeurs $+b$ et $-b$. La courbe (fig. 71) est donc deux fois tangente aux côtés verticaux et trois fois tangente aux côtés horizontaux du rectangle.

Lorsque la courbe obtenue sur l'écran E est fermée on est donc sûr que les fréquences des deux diapasons sont en rapport simple.

II. — QUARTZ

36. Propriétés piézoélectriques. — Pour exciter les vibrations d'un morceau de quartz on utilise ses propriétés piézoélectriques.

1° Un cristal de quartz a schématiquement la forme d'un prisme hexagonal. Découpons dans ce cristal une lame mince suivant trois directions rectangulaires définies comme suit (fig. 72).

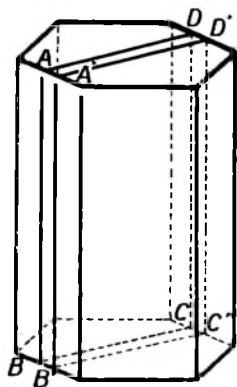


Fig. 72.

AB est parallèle à l'axe de symétrie.

AD est perpendiculaire à un côté de l'hexagone.

AA' est parallèle à ce même côté.

Plaçons cette lame dans un champ électrique constant parallèle à AA'. Le cristal se dilate aussitôt (ou se contracte selon le sens du champ) suivant la dimension AA', tandis qu'il se contracte (ou se dilate) suivant la dimension AD ; la dimension AB

et le volume du cristal ne sont pas modifiés.

Le phénomène est réversible, on peut, en comprimant le cristal, faire apparaître des charges électriques sur les faces ABCD et A'B'C'D' d'une part, AA'BB' et CC'DD' d'autre part.

2° Supposons maintenant le champ alternatif ; le cristal se dilate et se contracte périodiquement suivant les directions AA' et AD et ces déformations, pour des champs de valeur moyenne,

restent en général très faibles. Cependant, elles peuvent devenir exceptionnellement élevées (au point de briser le cristal) lorsque la fréquence du champ excitateur est précisément la même que celle des vibrations propres du quartz ; il y a alors résonance, le cristal vibrant en demi-onde. Naturellement il peut y avoir résonance soit pour les vibrations s'effectuant suivant AA' soit pour celles qui s'effectuent suivant AD. Il existe donc pour une même lame deux fréquences propres dont les valeurs sont inversement proportionnelles aux dimensions AA' et AD. Pour fixer les idées, suivant AA' la longueur d'onde obtenue est de 105 mètres par millimètre (d'épaisseur), tandis que suivant AD elle est de 150 mètres par millimètre (de largeur).

On réalise ainsi sans aucune difficulté (en employant des lames de 1 millimètre d'épaisseur par exemple) des vibrateurs mécaniques effectuant par seconde plusieurs millions d'oscillations ; cette rapidité extrême est certainement très précieuse en radio-phonie mais en ce qui nous concerne elle présente plutôt des inconvénients. Pour la réalisation d'horloges piézoélectriques il est en effet beaucoup plus commode de partir de fréquences relativement basses ; on est alors amené à utiliser soit des quartz de dimensions notables et par conséquent d'un prix très élevé, soit des oscillateurs plus compliqués formés par exemple d'une longue barre d'acier équipée avec deux petites lames de quartz collées à la gomme laque.

3° Les déformations d'un quartz sont toujours trop faibles pour être mesurées par des procédés purement mécaniques. On les met pourtant facilement en évidence, en ayant recours en particulier aux phénomènes suivants :

a) *Biréfringence accidentelle*. — Une lame de quartz placée entre deux nicols que l'on règle ensuite pour l'extinction fait réapparaître la lumière (aux nœuds) lorsqu'elle vibre en résonance avec le champ excitateur.

b) *Luminescence*. — Placée dans une atmosphère de néon sous une pression de quelques millimètres de Hg, le quartz s'illumine dans les régions où la vibration provoque l'apparition de charges électriques suffisantes.

c) *Variation de capacité.* — Le pouvoir inducteur apparent d'un quartz présente une discontinuité extrêmement nette au moment de la résonance ; un simple ampèremètre suffit donc pour repérer celle-ci.

4° Les changements de température font varier d'une manière sensible la fréquence des quartz ; le coefficient de température est de l'ordre de quelques cent millièmes par degré si l'on ne prend pas de précautions spéciales, mais on a pu, moyennant certains artifices de taille, le réduire à 2 millionièmes seulement.

37. — Entretien. — C'est au moyen de triodes (fig. 73), en utilisant un montage déjà indiqué

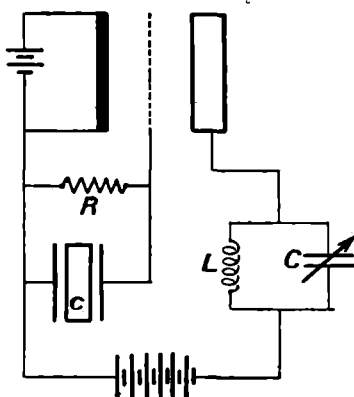


Fig. 73.

pour les diapasons, que l'on entretient les oscillations des quartz. Le crital c légèrement pressé entre deux armatures métalliques, est placé dans le circuit-grille, en parallèle avec une résistance R très élevée qui maintient le potentiel de la grille à une valeur convenable, tandis qu'un circuit oscillant CL est inséré dans le circuit plaque. Le léger couplage dû aux capacités internes de la triode suffit à

assurer l'entretien des oscillations, du moins tant que la capacité C reste comprise entre certaines limites.

38. Comparaison de deux quartz. Battements. — Pour comparer entre eux deux quartz dont les fréquences f et f' sont très voisines, on utilise avec avantage les phénomènes de battements :

Réalisons le schéma de la figure 74 sur lequel L et L' représentent les inductances des deux oscillateurs, L_1 une bobine de couplage, D un détecteur et T un téléphone shunté par le condensateur C . Réglons les couplages de telle sorte que les tensions

induites par les deux oscillateurs dans L_1 aient même amplitude et choisissons pour origine des temps l'instant où ces tensions sont en phase.

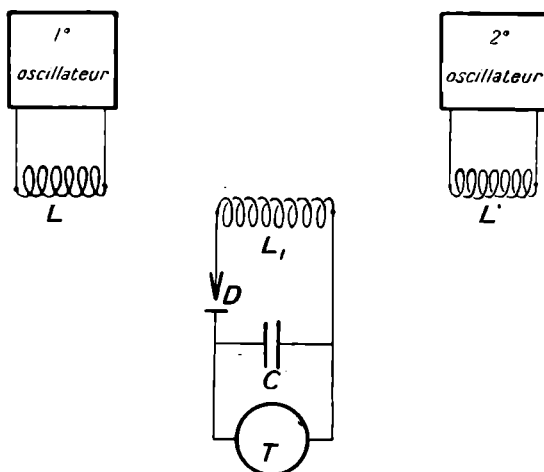


Fig. 74.

La force électromotrice induite dans le circuit de mesure est de la forme

$$\begin{aligned} e &= A (\sin 2\pi f t + \sin 2\pi f' t) \\ &= 2A \cos 2\pi \frac{f - f'}{2} \sin 2\pi \frac{f + f'}{2} t. \end{aligned}$$

Puisque f et f' sont très voisins, $f - f'$ est très petit, vis-à-vis de $\frac{f + f'}{2}$. Nous pouvons donc considérer l'expression précédente comme une fonction sinusoïdale du temps de fréquence $\frac{f + f'}{2}$ et dont l'amplitude lentement variable $2A \cos 2\pi \frac{f - f'}{2} t$, passe par un maximum lorsque le cosinus est égal soit à $+1$, soit à -1 , c'est-à-dire $f - f'$ fois par seconde.

Quoique modulée à la fréquence $f - f'$ cette tension e se comporte vis-à-vis d'un téléphone comme une fonction de fréquence

$\frac{f + f'}{2}$ et ne peut en faire vibrer la membrane dont l'inertie est trop considérable. C'est pour cette raison qu'on a dû intercaler le détecteur D qui, transformant le produit précédent en une somme, sépare l'une de l'autre les fréquences $\frac{f + f'}{2}$, et $f - f'$; le courant de fréquence $\frac{f + f'}{2}$ passe alors par le condensateur tandis que le courant de fréquence $f - f'$ fait vibrer le téléphone. La hauteur du son de battement donne donc la différence entre les fréquences des deux quartz étudiés.

III. — MULTIPLICATION ET DÉMULTIPLICATION DE FRÉQUENCE

Ce n'est pas tout d'avoir réalisé un oscillateur à diapason ou à quartz dont la fréquence reste rigoureusement constante ; il faut encore compter ses oscillations, les totaliser sur le cadran d'une horloge. Cette « démultiplication de fréquence » s'obtient couramment en utilisant suivant les cas :

Des engrenages,
Des harmoniques,
ou des oscillations de relaxation.

39. Par moteur synchrone et engrenages. — Nous n'insisterons pas sur les propriétés bien connues des engrenages ; nous signalerons simplement que si leur usage devient impossible dès que la fréquence est un peu élevée, il est par contre très avantageux pour des fréquences relativement basses. Prenons par exemple un diapason de fréquence 200 entretenu par triodes et faisons passer son courant d'alimentation dans un petit moteur synchrone ; si le rotor de celui-ci comporte vingt dents, il tournera à la vitesse de vingt tours par seconde et une démultiplication de mille deux cents facile à réaliser avec deux vis sans fin,

suffira pour manœuvrer une aiguille des secondes sur un cadran d'horloge.

Les petits moteurs synchrones généralement utilisés ne peuvent fournir qu'une puissance très faible, juste suffisante pour actionner une minuterie ; dans le cas où l'on aurait besoin d'une puissance élevée, 1 kilowatt par exemple, on adopterait avantageusement le dispositif suivant pour commander par un diapason un moteur à courant continu :

L'arbre du moteur est muni d'un disque (fig. 75) dont une

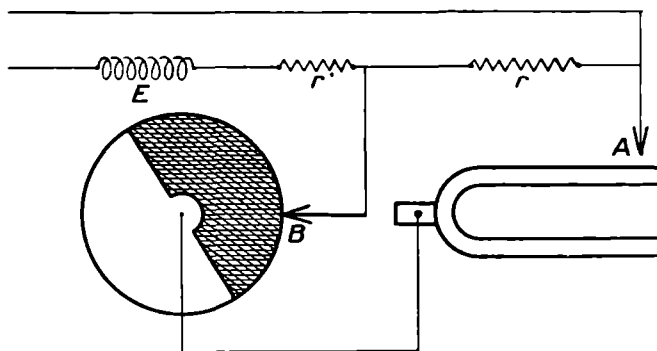


Fig. 75.

moitié est isolante, l'autre conductrice. Par l'intermédiaire d'un contact A disposé à l'extrémité du diapason, le balai B court-circuite lorsqu'il frotte sur la partie conductrice du disque une résistance r placée dans le circuit d'excitation du moteur ; au moyen d'une autre résistance r' on s'arrange pour que le nombre de tours du moteur soit un peu plus grand que le nombre de vibrations du diapason lorsque r est en circuit, un peu plus petit quand r est court-circuité.

Si, pendant tout le temps que dure le contact A (une demi-période par exemple) le balai B est sur la partie isolante, le moteur va trop vite. Si au contraire pendant tout ce temps-là le balai B est sur la partie conductrice, le moteur va trop lentement. La vitesse du moteur va donc se régler sur la fréquence du diapason et sa phase sera telle que le contact en A commence quand B

est sur le secteur isolant et finisse quand B est sur le secteur conducteur.

A chaque tour, la vitesse du moteur pourra subir de petites oscillations, d'autant plus faibles que r et r' auront été mieux ajustées, mais sa vitesse moyenne sera constante.

40. Par utilisation d'harmoniques. — Une vibration périodique de forme quelconque peut être développée en série de Fourier, c'est-à-dire être décomposée en une somme de vibrations sinusoïdales dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale. L'importance de ces harmoniques est d'autant plus grande que la vibration fondamentale s'éloigne davantage de la sinusoïde et, d'autre part, on sait que, en ce qui concerne les phénomènes de résonance, chacun de ces harmoniques se comporte comme s'il était seul, absolument indépendant des autres.

1^o Considérons par exemple un diapason équipé électriquement ; son courant d'entretien est loin d'être sinusoïdal, surtout s'il s'agit d'un appareil à trembleur, et nous pouvons facilement déceler ses harmoniques successifs (qu'il ne faut pas confondre avec les sons supérieurs du diapason), jusqu'au centième pour fixer les idées. Il nous suffira pour cela de disposer dans le circuit d'entretien un circuit oscillant ; en manœuvrant lentement le condensateur de celui-ci nous obtiendrons successivement la résonance pour tel harmonique que nous voudrons. Ainsi, pour un diapason donnant la note ut_5 , c'est-à-dire pour une fréquence fondamentale de 1.024 (1) celle du quarante-neuvième harmonique sera de 50.176, ce qui nous permettra en particulier de comparer à ce diapason, par une méthode de battements par exemple, un quartz vibrant à la fréquence 50.000.

2^o Les oscillateurs à triodes fournissent également des harmoniques, en quantité d'autant plus grande qu'ils sont plus éloignés

(1) Dans l'échelle des physiciens (différente de celle des musiciens), les nombres mesurant les fréquences des différents ut sont les puissances successives de 2 ; $ut_5 = 2^{10}$.

de la limite d'entretien, c'est-à-dire que l'on utilise davantage les parties courbes de la caractéristique. Si d'ailleurs l'oscillateur lui-même ne produisait pas des harmoniques en proportion suffisante, il serait facile d'en faire apparaître en déformant dans une triode amplificatrice l'onde obtenue, en exagérant par exemple la tension plaque ou la polarisation de la grille.

Pour mettre ces harmoniques en évidence, on équipe la triode avec deux circuits oscillants (fig. 76), l'un couplé à la bobine grille et qui entretient l'oscillation fondamentale, l'autre que l'on réserve aux harmoniques et qui les donne tous successivement à mesure que l'on manœuvre son condensateur.

3^e Cependant, à mesure que le numéro d'ordre des harmoniques s'élève, leur amplitude diminue, et, en outre, il devient de plus en plus difficile de les distinguer les uns des autres. Aussi, lorsqu'on désire obtenir un rapport de fréquences très élevé, est-il nécessaire d'employer plusieurs étages de multiplication ; voici par exemple comment on opérera :

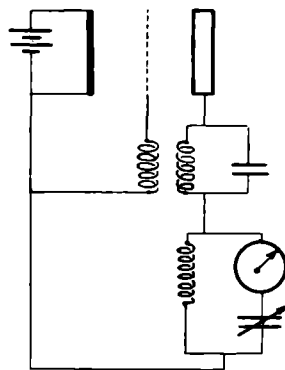


Fig. 76.

C'est un fait bien connu que lorsqu'on essaie d'amener deux oscillateurs à l'accord parfait en faisant varier progressivement la fréquence propre de l'un d'eux, il se produit à un instant donné une disparition brusque des battements ; les oscillateurs sont synchronisés, ils se sont accrochés. Il existe alors toute une plage de synchronisation dont l'étendue dépend du couplage des deux circuits, dans laquelle ils sont rigoureusement à la même fréquence, cette fréquence commune étant d'ailleurs variable quand on modifie légèrement les caractéristiques de l'un d'eux.

Mais on peut également obtenir cette synchronisation dans le cas moins simple où le second oscillateur a comme fréquence fondamentale celle d'un harmonique du premier ; le phénomène est identique, la plage de synchronisation devenant toutefois moins étendue, même si le couplage des deux circuits est important.

Et enfin, à condition d'avoir de la patience, de doser convenablement les couplages et de ne manœuvrer que très lentement les condensateurs variables, on peut ajouter successivement au système précédent de nouveaux oscillateurs, chacun d'eux étant synchronisé avec un harmonique du précédent. On réalise ainsi un multivibrateur d'un genre spécial, fournissant un nombre considérable d'harmoniques dont le rang quoique très élevé se détermine sans aucune difficulté ; et ces harmoniques sont tous très intenses parce qu'ils se trouvent renforcés et créés à nouveau pour ainsi dire par chaque oscillateur que l'on ajoute. Fait essentiel : si l'on agit sur l'un quelconque des oscillateurs du système, sans toutefois dépasser les limites de la plage de synchronisation correspondante, on modifie la période fondamentale de l'ensemble qui se trouve entraîné en bloc, la fréquence de l'oscillateur le plus rapide étant toujours un multiple exact de celle de l'oscillateur le plus lent.

On a pu ainsi arriver à synchroniser l'un sur l'autre jusqu'à sept oscillateurs successifs s'étageant depuis la fréquence 50 jusqu'à la fréquence 75.000.000 (4 mètres de longueur d'onde). Sans aller si loin, on conçoit sans peine qu'avec quatre étages démultiplicateurs dont le plus rapide est commandé par un quartz on puisse finalement actionner un moteur synchrone et par l'intermédiaire d'engrenages les aiguilles d'une horloge. Il est bien évident toutefois que, en raison des complications apportées par la démultiplication et de la surveillance continue qu'elle nécessite, ces horloges à quartz ou à diapason ne peuvent être installées que dans des observatoires spécialement outillés.

41. Oscillations de relaxation. — 1° Dans les systèmes oscillants que nous avons considérés jusqu'ici l'énergie passait alternativement de la forme potentielle (emmagasinée dans un ressort, un condensateur...) à la forme cinétique (appliquée à une masse, une self-induction...). L'amortissement était négligeable de sorte qu'à chaque instant, en appelant P l'énergie potentielle et C l'énergie cinétique, nous avons

$$P + C = \text{Constante.}$$

Le calcul de ces énergies indiquait toujours que P était proportionnel au carré d'une certaine variable x tandis que C était proportionnel au carré de sa dérivée $\frac{dx}{dt}$

$$P = \frac{1}{2} ax^2 \quad C = \frac{1}{2} b \left(\frac{dx}{dt} \right)^2$$

de sorte que l'équation précédente devenait après dérivation :

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{a}{b}x.$$

Nous avons affaire à des oscillations sinusoïdales de période

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{b}{a}}.$$

C'est ainsi que nous avons trouvé par exemple :

Pour le pendule de torsion :

$$P = \frac{1}{2} c\theta^2 \quad C = \frac{1}{2} I\omega^2 \quad \text{avec} \quad \omega = \frac{d\theta}{dt},$$

d'où

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{c}},$$

(c , couple pour 1 radian ; θ angle d'écart ; ω vitesse angulaire ;
I moment d'inertie)

et pour un circuit électrique

$$P = \frac{1}{2} \frac{q^2}{c} \quad C = \frac{1}{2} li^2 \quad \text{avec} \quad i = \frac{dq}{dt},$$

d'où

$$T = 2\pi \sqrt{cl},$$

(q , charge électrique ; c , capacité ; l , self-induction, i intensité).

L'amortissement (du moins tant qu'il était suffisamment faible) ne figurait pas dans la formule donnant la période, celle-ci dépendant seulement du rapport entre le coefficient d'inertie (b) et le coefficient d'élasticité (a).

2° Mais on rencontre également des phénomènes dans lesquels l'amortissement est important ; il faut alors ajouter à la formule donnant la période un terme correctif dont l'importance croît évidemment avec la valeur de cet amortissement. Sans nous arrêter à ces états intermédiaires, poussons les choses à l'extrême et supposons que l'amortissement devienne énorme tandis

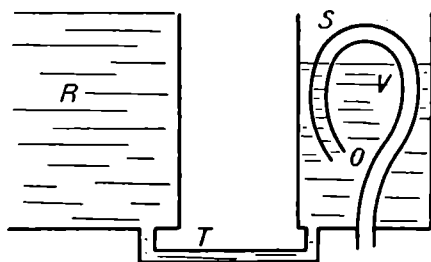


Fig. 77.

qu'un des termes a ou b (b par exemple) devient négligeable ; la période, si les circonstances permettent au phénomène de rester périodique, ne dépendra plus que du temps mis par l'énergie potentielle à se dissiper dans le milieu ambiant (ou à s'emmagasiner malgré lui) ; elle dépendra

uniquement de la durée d'une diffusion, d'une relaxation. Nous aurons ainsi obtenu des oscillations dites de « relaxation » non sinusoïdales, procédant par sauts successifs, et dont la période sera proportionnelle au produit de l'amortissement par le coefficient a .

On rencontre de ces oscillations de relaxation dans toutes les branches des sciences expérimentales. Citons entre autres : le claquement d'un drapeau, le grincement d'une porte, le fonctionnement de l'embouchure de flûte ou de l'interrupteur de Wehnelt ; les battements du cœur, le sommeil des fleurs (1), le retour périodique des épidémies et des crises industrielles. Certaines d'entre elles ont pu être complètement étudiées par le

(1) Linné songeait déjà, paraît-il, à utiliser le sommeil des fleurs pour actionner une horloge.

calcul : le problème des poissons par exemple (variation périodique du nombre de maquereaux en présence des thons qui les dévorent) a été traité par Volterra ; le chant des lignes téléphoniques sous l'action du vent par Lord Rayleigh. Nous nous bornerons pour exposer leurs propriétés à un exemple simple d'hydraulique que nous transposerons ensuite en électricité.

a) On connaît le dispositif classique du « vase de Tantale » (à niveau constant) (1) représenté schématiquement sur la figure 77. L'eau d'un large réservoir R s'écoule lentement par un tube capillaire T dans le vase V où elle s'accumule jusqu'au moment où son niveau atteint la partie supérieure S d'un siphon ; celui-ci s'amorce alors et le vase se vide très rapidement jusqu'au moment où le niveau de l'eau atteint l'orifice O. Aussitôt le siphon se désamorce, le vase recommence à se remplir, et le même phénomène se répète indéfiniment ; sa période est évidemment proportionnelle à la capacité du vase et en raison inverse du débit du tuyau T. Un dispositif analogue se retrouve dans les sources intermittentes, l'eau d'infiltration s'accumule lentement dans les cavités naturelles pour en être ensuite chassée périodiquement.

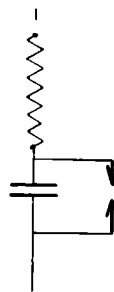


Fig. 78.

b) Il est facile de réaliser en Électricité (fig. 78) un montage absolument calqué sur le précédent en alimentant à travers une grande résistance et par une source à tension constante un condensateur shunté par un éclateur. Dans ces conditions la tension aux bornes du condensateur, nulle au début de l'expérience, augmente progressivement jusqu'au moment où elle est assez grande pour faire jaillir une étincelle. Le condensateur est alors brusquement court-circuité et se décharge, l'étincelle s'éteint et le phénomène recommence suivant la même loi (la figure 79 repré-

(1) Dans les anciens traités de physique, on plaçait en S la bouche d'une petite statuette ; l'eau montait jusque dans le voisinage de celle-ci, mais au moment où elle allait l'atteindre le vase se vidait. D'où le nom donné à l'appareil.

sente en fonction du temps le courant dans la résistance et la tension aux bornes du condensateur).

La fréquence des oscillations est facile à calculer. Désignons

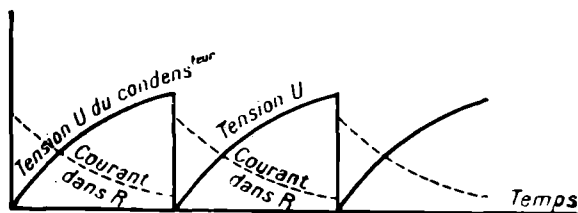


Fig. 79.

par U_0 la tension donnée par la source, par U_1 la tension déterminant l'étincelle et par u la tension instantanée aux bornes du condensateur. En écrivant que pendant un intervalle de temps dt le courant $\frac{U_0 - u}{R}$ augmente de $C du$ la charge du condensateur, nous obtenons l'équation

$$\frac{U_0 - u}{R} dt = C du \quad \text{d'où} \quad u = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{CR}} \right).$$

La période est donnée par la formule

$$T = CR \log \left(\frac{U_0}{U_0 - U_1} \right),$$

elle est, comme on devait s'y attendre, proportionnelle à la résistance R et à la capacité C ; on peut la rendre très grande en choisissant U_0 voisin de U_1 .

En pratique, on remplace toujours l'éclateur par une lampe au néon qui possède des propriétés analogues (1) mais dont le fonctionnement est plus régulier et qui nécessite une tension moindre. Si l'on désirait rendre la courbe de décharge moins

(1) Une veilleuse ordinaire Philips pour 110 volts continus s'amorce pour 105 volts environ et s'éteint pour 85 ; à noter que son fonctionnement est légèrement modifié par la lumière extérieure.

brutale, il suffirait de placer en série avec la lampe au néon une résistance convenable.

c) Basé sur le même principe, mais d'une réalisation différente, le multivibrateur Abraham est équipé avec des triodes.

La figure 80 donne le schéma du montage. Les plaques de deux triodes sont reliées au pôle positif de la batterie de plaque par des résistances ($r_1 = r_2 = 50.000$ ohms). Chacune des deux « grilles » est reliée d'une part à la plaque de l'autre lampe par un condensateur ($C_1 = C_2 = 0,5$ microfarad), et d'autre part au pôle positif de la batterie de chauffage par une résistance de décharge ($R_1 = R_2 = 100.000$ ohms).

Il est aisé de se rendre compte que ce système de deux lampes fortement liées ne peut pas se maintenir dans un régime stable dans lequel les deux circuits de plaque débiteraient en même temps.

Pendant que la lampe L_1 débite la lampe L_2 a un courant de plaque nul parce que sa grille est fortement négative. Mais la charge négative de cette grille G_2 et celle de son condensateur C_2 se dissipent progressivement à travers la résistance de décharge R_2 , et le potentiel de G_2 finit par atteindre une valeur telle que la plaque P_2 puisse commencer à débiter du courant. A ce moment le régime devient brusquement instable, le potentiel de la grille G_1 devient presque instantanément négatif, et la plaque P_1 cesse de débiter. Il en est ainsi jusqu'à ce que G_1 redevienne positive et qu'une nouvelle inversion se produise ; et les inversions se répètent périodiquement.

L'intervalle de deux inversions de même sens est proportionnel à la « constante de temps » $R_1C_1 + R_2C_2$, et l'on peut donner à la période telle valeur que l'on désire en agissant sur les capacités C ou sur les résistances R . Avec des capacités C de l'ordre de $0,5$ microfarad et des résistances R de l'ordre de $100\ 000$ ohms,

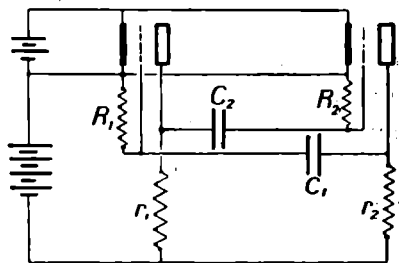


Fig. 80.

la période est voisine de un dixième de seconde, et peut être d'ailleurs ajustée sans trop de difficultés à moins de 0,1 p. 100 près.

42. Démultiplication par oscillations de relaxation. —

Maintenant que nous savons produire des oscillations de relaxation, voyons comment on peut les utiliser en chronométrie.

1° La propriété essentielle de ces oscillations, c'est de ne pas être sinusoïdales. Avec une lampe au néon (équipée avec une résistance et une capacité) ou avec un multivibrateur Abraham, les discontinuités de courant sont extrêmement brusques et l'on peut mettre facilement en évidence une centaine d'harmoniques. On dispose donc là d'un intermédiaire extrêmement commode pour comparer des fréquences très différentes.

Mais, une autre caractéristique des oscillations de relaxation, c'est que leur fréquence est assez mal définie ; cette fréquence dépend en effet d'un frottement, d'une résistance, d'un coefficient de diffusion... et l'on sait que pratiquement ces quantités sont assez sujettes à variations beaucoup plus qu'une masse ou qu'une élasticité. En outre, la courbe représentant ces oscillations présente souvent des régions presque horizontales précédant des renversements brusques et dans lesquelles elles sont particulièrement sensibles aux perturbations de toute sorte.

Reprenons par exemple le système étudié en premier lieu (résistance, condensateur, éclateur) et donnons à la source de courant une tension U à peine supérieure à celle qui est nécessaire pour faire éclater l'étincelle. La courbe représentative de la tension u aux bornes de l'éclateur présente une partie presque horizontale ; on conçoit aisément qu'une légère perturbation dans l'état des potentiels puisse déclancher prématurément l'étincelle et modifier ainsi la période.

2° Il semblerait que cette instabilité de fréquence puisse être un grave inconvénient pour les mesures chronométriques. Heureusement, il n'en est rien, le remède étant à côté du mal, car à cause même de leur instabilité, ces oscillations de relaxation se

laissent très facilement synchroniser par un oscillateur sinusoïdal (1).

a) Reprenons le vase de Tantale, en y versant quelques gouttes d'eau périodiquement au moment où le siphon est près de s'amorcer, nous pouvons modifier nettement la fréquence du phénomène si le niveau de R est suffisamment bas.

Dans un oscillateur au néon, réglons la résistance de telle manière que la fréquence soit naturellement 45 et faisons appa-

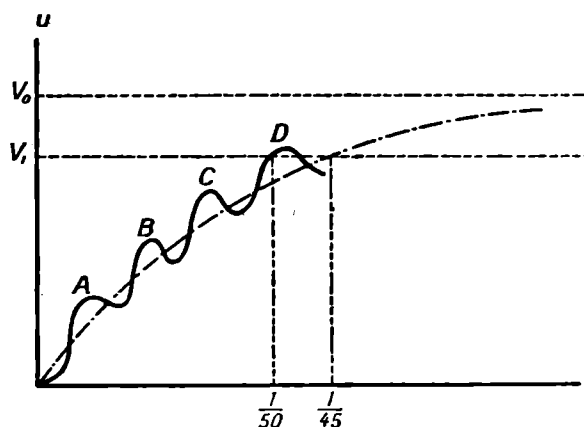


Fig. 81.

raître par induction une faible tension alternative de fréquence 50, nous constaterons que le système abandonne sa période normale pour osciller lui aussi à la fréquence 50.

b) Mais nous pouvons faire mieux encore ; donnons au léger courant alternatif supplémentaire une fréquence 200, le circuit précédent vibre encore à la fréquence 50 (il se synchronise sur le sous-harmonique de 200 dont la fréquence est immédiatement

(1) Par exemple dans le cas d'une flûte, l'air soufflant contre l'embouchure produit une oscillation de relaxation du type éolien ; ces oscillations sont synchronisées par l'air du tuyau qui ne peut osciller que sinusoïdalement.

De même, on améliore notablement le fonctionnement d'un interrupteur de Wehnelt en superposant au courant continu d'entretien un très léger courant alternatif de fréquence convenable.

supérieure à 45) ; on verra facilement pourquoi sur la figure 81 qui représente dans ces conditions la tension aux bornes du condensateur : la tension alternative n'a aucun effet en A, B, C, mais son influence se fait sentir en D. Il est ainsi possible, non seulement de réaliser au moyen d'une lampe au néon (fig. 82) l'entretien d'un diapason, mais encore de réaliser une démultiplication de fréquence (1) pouvant atteindre la valeur 100.

c) Inversement, il nous est possible d'obtenir une multiplication de fréquence ; supposons en particulier que nous voulions,

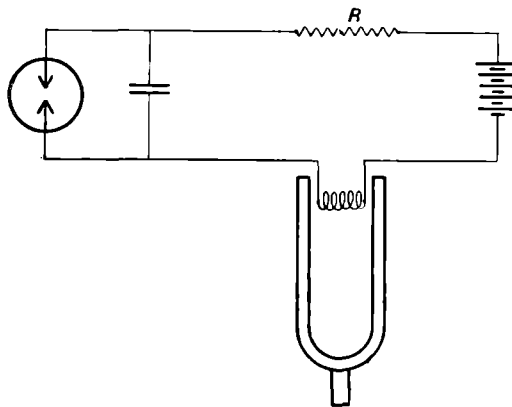


Fig. 82.

en vue d'un étalonnage, inscrire sur un cylindre tournant les dixièmes de seconde, en partant d'une horloge astronomique. Nous réglons notre appareil au néon (ou notre multivibrateur) pour la fréquence 10, mais comme ce réglage n'est pas parfait nous prenons soin de remettre cet appareil à l'heure chaque deux secondes en imposant, au moyen d'un contact commandé par l'horloge, un potentiel déterminé au condensateur ; nous avons ainsi réalisé une multiplication par 20 (2).

On voit tout le parti qu'on peut tirer en chronométrie de ces oscillations de relaxation si faciles à produire et à synchroniser.

(1) Le même phénomène a pu être réalisé pour le sommeil des fleurs.

(2) Abraham. Onde électrique n° 1.

TROISIÈME PARTIE

DISTRIBUTION DE L'HEURE

CHAPITRE V

RÉCEPTEURS AYANT UNE PÉRIODE PROPRE

I. — HORLOGES SYNCHRONISÉES

43. Etude mathématique de la synchronisation. — Prenons un système oscillant dont la fréquence propre est $\frac{\omega}{2\pi}$; amortissons-le par un frottement proportionnel à la vitesse, puis faisons agir sur lui un couple sinusoïdal dont la valeur maxima est A et la fréquence $\frac{\Omega}{2\pi}$.

L'équation du mouvement est :

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + f \frac{d\theta}{dt} + Mgl\theta = A \sin \Omega t.$$

Nous savons que son intégrale générale est la somme de deux termes.

L'un qui est l'intégrale générale de l'équation sans second membre a pour expression (voir page 18)

$$\theta_1 = Be^{-\lambda t} \sin \omega_1 t$$

avec

$$\lambda = \frac{f}{2I} \quad \text{et} \quad \omega_1 = \omega - \frac{\lambda^2}{4\pi},$$

il correspond aux oscillations libres du système, dépend des conditions initiales et s'amortit plus ou moins rapidement suivant la valeur de λ .

L'autre est une intégrale particulière de l'équation sans second membre, soit

$$\theta = \alpha \sin (\Omega t - \varphi)$$

en posant :

$$\alpha = \frac{A \sin \varphi}{f\Omega} \quad \text{et} \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{2\lambda\Omega}{\omega^2 - \Omega^2};$$

il correspond à des oscillations forcées. Ainsi, au bout d'un certain temps pendant lequel on aura observé des battements d'amplitude décroissante, le mouvement deviendra pratiquement sinusoïdal, le couple exciteur imposant sa période au système oscillant.

1^o Discussion. — Les formules précédentes nous permettent de voir comment varient α et φ lorsque pour des valeurs données de λ et de ω on fait varier Ω .

Si les deux pulsations Ω et ω sont égales, $\operatorname{tg} \varphi$ est infini quel que soit l'amortissement ; le mouvement du balancier est en retard de $\frac{\pi}{2}$ sur le couple exciteur ; ce dernier est en phase avec la vitesse et c'est évidemment dans ces conditions que l'énergie reçue par le système oscillant est maxima.

Si Ω est inférieure à ω , c'est-à-dire si la fréquence du couple exciteur est inférieure à la fréquence des oscillations propres du système $\operatorname{tg} \varphi$ est positif ; la vitesse du mouvement est en avance sur le couple exciteur.

Enfin, si Ω est supérieur à ω , c'est l'inverse qui se produit, la vitesse du mouvement étant en retard sur le couple exciteur.

REMARQUE. — Ce raisonnement n'est applicable en toute rigueur qu'à un couple sinusoïdal ; nous admettrons cependant sans calcul que ses conclusions restent encore valables dans leurs

grandes lignes pour les impulsions discontinues qui, pratiquement, sont les seules utilisées en horlogerie.

2° Application. — Pour montrer que la synchronisation de deux pendules est pratiquement réalisable sans grandes difficultés, faisons une application numérique. Prenons le pendule battant la demi-seconde dont il est question à la page 17 et pour lequel $\lambda = 0,01$; entretenons son mouvement par un couple dont nous ferons varier la période aux environs de 1 et calculons les valeurs correspondantes de φ et de α . Nous obtenons le tableau suivant :

Période excitatrice $\frac{2\pi}{\Omega}$	1	1,0001	1,0003	1,001	1,003	1,01	1,03
$\text{tg } \varphi$	∞	16	5,3	1,6	0,53	0,16	0,05
Déphasage φ	90°	86°	79°	58°	28°	9°	3°
Amplitude α en valeur relative	1	0,99	0,98	0,85	0,47	0,16	0,05

Pour obtenir avec une certaine dépense de courant le mouvement d'amplitude maxima, il faudrait amener la vitesse du balancier à être en phase avec le couple exciteur, c'est-à-dire rendre Ω égal à ω . Mais il est pratiquement impossible de réaliser cette condition d'une manière rigoureuse, et nous devons nous considérer comme largement satisfaits si nous pouvons obtenir, par exemple, une amplitude supérieure aux 98 p. 100 de l'amplitude maxima. Le tableau précédent nous montre qu'il suffit pour cela que la différence de phase entre le couple exciteur et la vitesse du balancier ne dépasse pas une dizaine de degrés et que la variation relative de fréquence reste inférieure à $\frac{3}{10.000}$ soit environ 25 secondes par jour. On voit que ces conditions sont très facilement réalisables, les deux pendules n'ayant besoin d'être accordés l'un sur l'autre que d'une manière assez grossière.

44. Réalisation. — La distribution de l'heure par synchronisation se fait pratiquement au moyen d'horloges à aimants permanents analogues à celles que nous avons étudiées page 48 et suivantes. La pendule distributrice seule est munie de piles et de contacts ; les réceptrices ne comportent qu'une bobine, un aimant et une minuterie.

1^o Constance de la période excitatrice. — Nous avons supposé dans nos calculs que la période du couple excitateur était rigou-

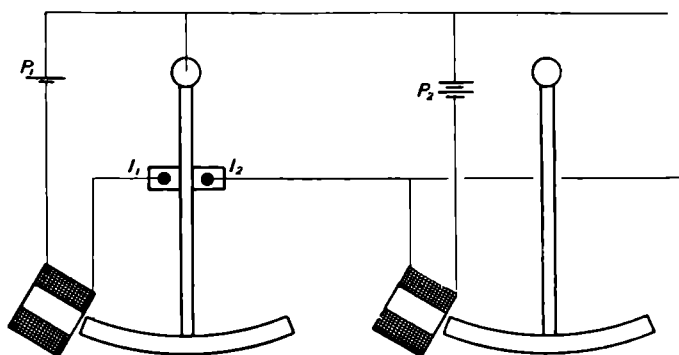


Fig. 83.

reusement constante ; il ne peut en être ainsi que si la réaction des pendules réceptrices sur la pendule distributrice est rigoureusement nulle. Nous devons donc rejeter le dispositif particulièrement simple qui consisterait à mettre en série avec une seule pile et un seul interrupteur les bobines de toutes les pendules, car le courant traversant la distributrice et par suite sa marche seraient influencés par la force contre-électromotrice des réceptrices. Il convient au contraire de séparer complètement du circuit de distribution le circuit d'entretien de la première pendule ; le schéma sera donc celui de la figure 83, l'entretien de la pendule mère étant assuré par la pile P_1 et le contact I_1 , le courant synchronisant étant fourni à toutes les réceptrices disposées en parallèle par la pile P_2 et le contact I_2 .

2° **Constance de la phase.** — Si l'on ne prend pas de précautions spéciales, ce système de distribution ne donne l'heure qu'à une fraction de seconde près, les différents balanciers n'étant pas nécessairement en phase. Cette précision est largement suffisante dans la plupart des cas, mais si l'on désire l'améliorer encore, dans un laboratoire par exemple, il suffit de mettre en dérivation sur chaque bobine un écouteur téléphonique, et de régler la longueur de chaque balancier pour que les tops se produisent tous ensemble au moment du passage par la verticale.

3° **Limitation de l'amplitude.** — L'amplitude du pendule synchronisé dépend beaucoup de la différence entre sa période propre et celle du pendule synchronisant ; elle pourrait par suite acquérir une valeur exagérée pour certaines conditions de réglage, si l'on ne prenait pas ses dispositions en conséquence : On peut, par exemple, munir l'horloge synchronisée d'une bague fixe en cuivre relativement éloignée de l'aimant ; cette bague n'a aucun effet sensible sur le mouvement tant que l'amplitude est normale, mais dès que celle-ci devient exagérée il se produit un amortissement énergétique par courant de Foucault.

On peut dans le même but munir l'horloge d'une butée en caoutchouc que vient heurter le balancier en fin de course ; cette butée a pour effet d'amortir le mouvement et de diminuer la période, ce qui facilite la régulation.

Enfin on peut munir le pendule synchronisé d'un contact qui fait dépendre l'impulsion motrice de la différence de phase entre les deux pendules, mais cela complique évidemment la réalisation des réceptrices.

45. Avantages et inconvénients. — Dans les horloges à aimant, par suite de l'excellent rendement du système moteur et de la simplicité du rouage, la puissance absorbée peut être rendue très faible ; si l'on a convenablement réglé le balancier d'une réceptrice, le courant qu'elle absorbe est de l'ordre de 0,1 à 0,2 milliampère.

Il en résulte de multiples avantages : la source de courant

peut être une simple pile même si le nombre de récepteurs est élevé ; le contact de l'horloge mère ne risque pas d'être détérioré ; enfin on peut utiliser pour la canalisation du fil de petit diamètre quelle que soit la distance qui sépare les récepteurs de l'horloge mère.

Les pièces en mouvement ne sont soumises qu'à des efforts extrêmement faibles, l'entraînement des aiguilles se faisant sans choc appréciable. Aussi le mécanisme est-il pratiquement inusable ; en outre il fonctionne sans bruit, ce qui est particulièrement apprécié dans certains cas (appartements, hôpitaux...).

Malgré la faible valeur du courant synchronisant, ce système présente cependant une grande sûreté de fonctionnement : des courants parasites même intenses induits dans la canalisation ne peuvent produire ni ratés ni avances anormales, car les récepteurs ne sont sensibles que dans une bande de fréquences particulièrement étroite ; d'autre part l'énergie emmagasinée dans le balancier est assez considérable pour assurer l'avance du rochet même en cas de résistance anormale dans la minuterie ; enfin une interruption de courant de quelques instants ne présente aucun inconvénient.

Bien que ces réceptrices soient d'un mécanisme simple, elles sont cependant moins robustes et plus chères que les réceptrices demi-minute dont nous parlerons plus loin ; aussi leur usage est-il, en fait, limité au cas de petites installations intérieures et de cadrans de faibles dimensions.

Le démarrage et l'arrêt d'un balancier synchronisé demandant un certain temps, la remise à l'heure d'une réceptrice particulière ne peut pratiquement s'effectuer qu'à la main (1). Pour éviter d'avoir à renouveler souvent cette opération, il est commode de pouvoir remettre à l'heure tout le réseau à la fois et par suite de munir la pendule mère d'un dispositif permettant de faire varier la période pendant la marche (palette de fer doux réglable au voisinage de l'aimant, page 7).

En principe, la pendule mère et les réceptrices peuvent être de

(1) En particulier aux changements d'heure légale.

construction identique, mais en pratique il est préférable de porter tous ses soins sur la pendule mère qui sera un régulateur de précision, et d'utiliser comme réceptrices des pendules moins délicates et meilleur marché. C'est ainsi que dans le système Ato par exemple les réceptrices sont des pendulettes battant le quart de seconde, ne nécessitant aucun réglage ni mise d'aplomb ; la pendule mère, qui, pour donner une précision supérieure, doit battre la demi-seconde, fournit naturellement deux impulsions par oscillation complète.

Lorsque le nombre des réceptrices est très élevé, pour localiser les inconvénients qui résulteraient d'un court-circuit dans l'installation et pour éviter de faire traverser l'interrupteur de la pendule mère par un courant trop intense, on utilise des pendules-relais ; celles-ci n'ayant pas besoin de présenter une grande précision et pouvant être munies de contacts particulièrement robustes accroissent nettement la sécurité d'exploitation sans augmenter sensiblement le prix de revient.

II. — HORLOGES REMISES A L'HEURE

46. Principe. — Comme les précédentes, ces horloges possèdent un système oscillant ; elles en diffèrent par ce qu'elles sont autonomes, l'énergie nécessaire à l'entretien du balancier étant fournie par une pile locale et l'action de la pendule mère n'ayant lieu qu'à des intervalles de temps très éloignés.

Le dispositif de remise à l'heure est en principe le suivant (fig. 84) : La grande aiguille A est entraînée par friction sur son axe à frottement doux, l'adhérence

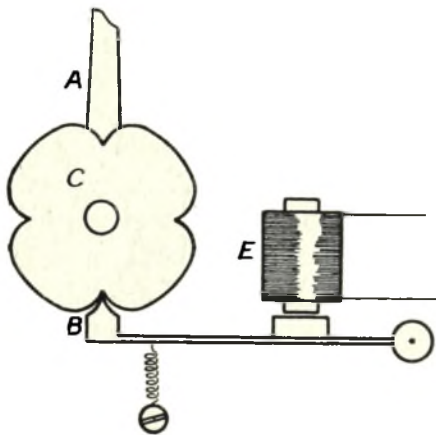


Fig. 84.

étant suffisamment faible pour que sans entraîner le rouage on puisse modifier son calage au moyen d'une came C à quatre encoches et d'un bras de commande B actionné par un électro-aimant E. Ce déplacement de la grande aiguille entraîne automatiquement un déplacement proportionnel de l'aiguille des heures de sorte que les positions relatives de ces deux aiguilles sont toujours conservées. Il suffit pour maintenir la pendule à l'heure qu'une horloge mère envoie périodiquement et à un moment convenable (l'heure ronde, le quart, la demie ou les trois quarts) un courant de courte durée dans l'électro.

La fréquence des remises à l'heure dépend évidemment de la précision demandée et de la perfection des pendules réceptrices ; en principe, une émission de courant par jour est largement suffisante.

Un argument que l'on cite souvent en faveur de ce système de distribution, c'est qu'en cas d'interruption des circuits d'alimentation la pendule à remise à l'heure continue à marcher, tandis que la pendule synchronisée s'arrête. C'est à notre avis un avantage très relatif, l'heure indiquée dans ces conditions étant forcément inexacte, d'autant plus que les constructeurs comptant sur la remise à l'heure périodique ne munissent pas en général ces pendules de mécanismes de précision ; et d'autre part on peut objecter qu'elles possèdent un mouvement autonome susceptible de se détraquer, tandis que les pendules synchronisées sont à l'abri de ce risque.

La supériorité des pendules à remise à l'heure tient plutôt, si elle existe, à la durée extrêmement courte du passage du courant, ce qui permet de réduire considérablement les frais d'établissement en utilisant pour leur alimentation des canalisations normalement affectées à un autre usage (lignes téléphoniques au moment où le trafic est pratiquement interrompu, lignes d'énergie électrique) ou même la radio-diffusion. De telles installations ont été effectivement réalisées et si elles ne se sont pas développées davantage, c'est qu'elles se sont heurtées à la concurrence d'autres solutions plus modernes proposées par ces réseaux de distribution, horloges parlantes pour les lignes téléphoniques,

horloges synchrones pour les secteurs d'éclairage. A titre d'exemple, nous allons montrer comment on peut utiliser pour la remise à l'heure d'une pendule d'appartement les émissions radiophoniques.

47. Commande par T. S. F. — Lorsqu'on ne possède pas de régulateur susceptible de jouer le rôle de pendule distributrice, on peut utiliser pour remettre ses pendules à l'heure les signaux horaires émis par les postes de T. S. F. Il suffit pour cela d'ajouter à un poste récepteur quelconque, un dispositif actionnant l'électro au moment convenable. On peut ainsi réaliser sur une très grande échelle une distribution d'heure remarquablement précise.

Il serait particulièrement intéressant de pouvoir utiliser pour cela les signaux horaires internationaux émis par la Tour Eiffel ; malheureusement ces signaux sont diffusés sur une longueur d'onde exceptionnellement élevée, à des heures où l'on n'est généralement pas à l'écoute et suivant un rythme assez compliqué. Aussi a-t-on préféré l'envoi de signaux horaires spéciaux intercalés pendant les entr'actes dans les programmes des concerts radiophoniques ; de la sorte chaque auditeur peut recevoir ces signaux sans aucune manœuvre spéciale au cours des émissions qu'il a l'habitude d'écouter.

Dans le système Ato-Radiola que nous allons décrire à titre d'exemple, le signal horaire déclanchant la remise à l'heure est constitué par une vingtaine de traits musicaux d'environ un quart de seconde séparés par des silences de même durée ; ce signal émis en ondes entretenues modulées se termine toujours soit à une heure ronde, soit au quart, à la demie ou aux trois quarts ; aussi la pendule réceptrice comporte-t-elle une came à quatre encoches comme celle que nous venons de décrire.

Comme tout dispositif de télécommande par T. S. F., le système de mise à l'heure envisagé doit assurer une protection efficace contre les brouillages et les parasites atmosphériques et pour cela comporter un nombre suffisant de systèmes oscillants peu amortis. Les fréquences de résonance correspondantes pou-

vaient être soit celle de l'onde porteuse (de l'ordre de 500.000), soit celle de la modulation téléphonique (environ 1.000) soit enfin celle des signaux (fréquence 2). En fait, l'expérience ayant montré que deux résonances étaient largement suffisantes on s'est contenté d'adjoindre à la résonance électrique sur l'onde porteuse (déjà réalisée dans le système d'accord du poste récepteur) une résonance mécanique à la fréquence des signaux reçus.

Comme le récepteur radiophonique fournit des signaux présentant la forme de courants musicaux régulièrement interrompus, on lui adjoint pour effectuer la remise à l'heure :

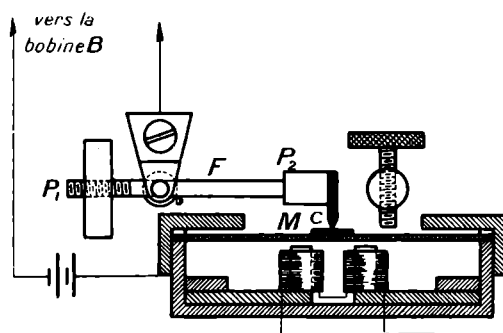


Fig. 85.

Un relais détecteur à très basse fréquence, éliminant la fréquence musicale et fournissant du courant continu périodiquement interrompu.

Un relais sélectif à retardement, sensible uniquement au cou-

rant de fréquence 2 et déclanchant à la fin des signaux l'électro de remise à l'heure de la pendule réceptrice.

1° Le premier de ces appareils (fig. 85) est constitué par un écouteur téléphonique ordinaire sur la membrane M duquel appuie l'extrémité C d'un fléau F pivotant en O et convenablement lesté par des poids P_1 et P_2 ; le poids P_1 étant réglable en position, on peut obtenir que ces deux poids se fassent presque équilibre et que la pression de la pointe C sur la membrane soit très faible. L'enroulement de l'écouteur téléphonique ainsi modifié est branché en parallèle sur le haut parleur dont il ne trouble pas le fonctionnement d'une manière sensible. Le contact entre la membrane M et le fléau F est intercalé dans un circuit électrique comprenant la batterie de chauffage du poste et la bobine B du relais représenté sur la figure 86.

Lorsque la membrane téléphonique ne vibre pas, le contact entre M et C est fermé en permanence et le courant de la batterie traverse en permanence la bobine B. Mais dès que cette membrane vibre, le fléau F en raison de son inertie ne peut suivre le mouvement trop rapide de la membrane téléphonique de sorte que la pointe C reste dans sa position supérieure, effleurant à peine à l'extrémité de sa course la membrane M ; le contact est

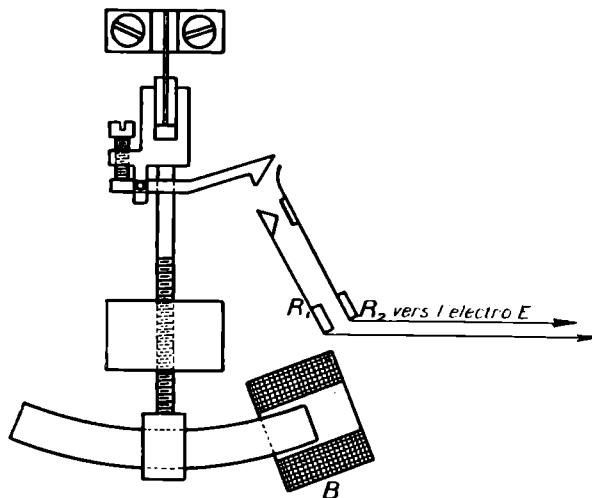


Fig. 86.

alors presque entièrement interrompu et l'intensité du courant qui traverse la bobine B est réduite à une valeur pratiquement nulle.

Ainsi, lorsque le poste de T. S. F. reçoit les signaux horaires rythmés, pendant l'émission d'un trait la membrane téléphonique se met à vibrer et le second relais n'est parcouru par aucun courant ; au cours des silences au contraire celui-ci est parcouru par un courant constant. L'intensité de ce courant doit être d'ailleurs choisie relativement faible (quelques milliampères), sans quoi le contact C serait vite détérioré ; il est sensiblement indépendant de l'intensité des signaux reçus par l'appareil de T. S. F. pourvu que celle-ci soit suffisante.

2° Le relais sélectif (fig. 86) est constitué par un petit pendule battant le quart de seconde et par conséquent accordé sur le signal horaire choisi. Ce pendule est tout comme une pendule réceptrice muni d'un aimant et d'une bobine B ; sous l'action du courant qui circule dans celle-ci il se met en route et lorsque l'amplitude de son mouvement est suffisante, il ferme le contact R_1 , R_2 commandant l'électro de remise à l'heure E représenté sur la figure 84.

Ce relais utilise d'une manière particulièrement satisfaisante le très faible courant qu'il reçoit du précédent ; l'énergie potentielle emmagasinée lentement grâce à la série de faibles impulsions qui ont mis en marche progressivement le pendule est utilisée brusquement pour assurer une fermeture très franche de l'interrupteur ; ce dernier est ainsi rendu très robuste et d'un fonctionnement très sûr.

Pour être à l'abri de toute surprise, on règle la masse du relais pendulaire de manière à assurer normalement la fermeture du contact R_1 , R_2 au bout d'une dizaine d'oscillations seulement ; la pendule n'en est pas moins remise à l'heure au moment exact, car la fermeture de l'interrupteur s'effectue à nouveau pendant les oscillations suivantes ; une butée amortissante empêche d'ailleurs les oscillations de prendre une amplitude exagérée et de se continuer après la cessation des signaux.

REMARQUE. — On a réalisé également des dispositifs de remise à l'heure complètement automatiques et fonctionnant sur les signaux radiotélégraphiques du Bureau international de l'heure ; mais ces appareils sont forcément beaucoup plus compliqués que le précédent et nous n'en donnerons pas la description.

III. — MOTEURS ÉLECTRIQUES SYNCHRONISÉS

On peut dans les horloges précédentes remplacer le mouvement alternatif du pendule par la rotation continue d'un moteur shunt alimenté à tension constante ; la puissance disponible devient ainsi beaucoup plus considérable et, d'autre part, les aiguilles

n'avançant plus par à-coups, il devient possible de mesurer de petites fractions de seconde. Par contre, comme la marche d'un moteur rotatif est bien moins régulière que celle d'un pendule, on est obligé de remettre à l'heure beaucoup plus souvent, chaque seconde par exemple.

Comme appareils utilisant ces « moteurs électriques synchronisés », nous décrirons les chronographes imprimants et l'horloge parlante de l'Observatoire de Paris.

48. Chronographes imprimants. — Lorsqu'il s'agit de mesurer avec une grande précision des temps relativement courts l'observation visuelle ne suffit plus ; on doit avoir recours à l'inscription graphique.

Dans les laboratoires on peut obtenir d'excellents résultats au moyen d'une bande enfumée qui se déroule d'un mouvement sensiblement uniforme et sur laquelle s'inscrivent en même temps que le phénomène à étudier les vibrations d'un diapason ou les tops d'une horloge (avec si possible la subdivision de la seconde (1) suivant la méthode de la page 120).

Mais ces dispositifs de laboratoire présentent souvent de sérieux inconvénients, dans le cas de compétitions sportives, par exemple, en raison des conditions précaires de l'installation de chronométrage placée parfois en plein air au bord d'une route. On peut leur reprocher en outre la grande longueur de papier déroulé pendant une épreuve de quelque durée, la difficulté du dépouillement et enfin l'impossibilité de proclamer immédiatement les résultats.

Aussi a-t-on été amené dans les épreuves sportives importantes à remplacer peu à peu les chronographes à aiguille dédoublante rattrapante anciennement utilisés, par des chronographes imprimants qui joignent à l'avantage de donner le $\frac{1}{100}$ de seconde celui de supprimer complètement les erreurs personnelles en

(1) En optique on remplace de même, pour faciliter les pointés, les interférences sinusoïdales par des franges de lames semi-argentées.

permettant de commander l'appareil directement par le phénomène à enregistrer sans passer par l'intermédiaire d'un observateur.

Un chronographe imprimant se compose principalement de :

Un chronomètre de précision muni de contacts électriques convenables.

Un moteur électrique synchronisé par le chronographe précédent.

Un jeu de tambours chiffrés dont l'avance est produite par le moteur précédent et dont l'empreinte est prise en temps voulu à l'aide d'un mécanisme de frappe.

1° Dans l'appareil Brillié-Leroy dont nous allons donner la description sommaire, la synchronisation procède du principe que nous avons déjà indiqué page 124.

a) Le circuit d'alimentation du moteur comporte en série deux commutateurs commandés l'un par le chronomètre tous les quarts de seconde, l'autre par l'arbre du moteur lui-même ; le courant d'entretien est par suite intermittent, le circuit étant fermé chaque fois par le chronomètre et interrompu par le moteur, et comme la durée de ces impulsions périodiques augmente en même temps que le retard du moteur sur le chronomètre, la synchronisation est assurée.

Pour un réglage convenable de l'ensemble, la durée de chaque impulsion est de $1/8$ de seconde ; mais si pour une raison quelconque, un enregistrement par exemple, le moteur vient à retarder, il coupe les émissions de courant plus tard, et celles-ci devenues plus longues tendent à ramener rapidement la vitesse à sa valeur normale ; si, au contraire, la vitesse du moteur tendait à augmenter, le courant moyen diminuerait.

Pour atténuer les petites oscillations dans la vitesse du moteur, ce dernier est muni d'un volant et l'admission du courant par tout ou rien que nous venons de décrire est atténuée par un courant permanent réglé au moyen d'un rhéostat ; ce dernier permet d'ailleurs de démarrer le moteur sans utiliser les contacts du chronomètre qui risqueraient d'être mis hors service par un courant exagéré.

Ce dispositif, tout en assurant le synchronisme, tolère évidemment de petites variations de phase, mais celles-ci ne pourraient avoir sur la précision du chronographe une influence sensible que si les variations de la tension ou du couple résistant étaient fortement exagérées.

b) Mécanisme imprimant.

Le moteur précédent entraîne à raison d'un tour par seconde une première molette gravée de 0 à 99 ; celle-ci, lorsqu'elle a accompli un tour complet, fait tourner brusquement d'un soixantième de tour une deuxième molette qui est gravée de 0 à 59 et qui commande de la même manière celle des minutes, puis celle des heures. En face de ces molettes est disposé un électro-aimant de frappe et entre les deux passent un ruban encreur et un ruban de papier qui n'avancent qu'après chaque impression. L'électro-aimant de frappe est du type « Hugues » où une palette de fer tirée par un ressort est amenée en contact avec un aimant permanent qui la maintient attirée. Si un courant électrique même très court diminue l'aimantation de l'aimant la palette de fer se trouve libérée (1) et vient presser pendant un court instant le papier et le ruban encreur contre les molettes, d'où l'impression faite au vol sur le papier de la position actuelle de ces molettes.

Dans les premières applications de ce chronographe (courses de traîneaux des jeux olympiques à Chamonix en 1924) l'enregistrement était assuré par le passage même du véhicule qui rompait un fil tendu en travers de la piste ou actionnait un interrupteur. Mais pour éviter les ratés et le danger que présente pour les coureurs l'établissement de tels contacts, on a été amené à utiliser un déclenchement automatique par cellule photoélectrique. Un phare d'automobile envoie en travers de la piste un faisceau lumineux qui est reçu de l'autre côté dans une cellule photoélectrique suivie d'un amplificateur et d'un relai. Toute interruption du faisceau lumineux par le passage d'un véhicule est ainsi automatiquement signalée ;

(1) On obtient ainsi, même pour des intensités de courant très faibles, une quantité d'énergie aussi grande qu'on le désire.

2° Dans le chronographe précédent, le choix du volant est quelque peu délicat ; s'il est trop léger, il laisse subsister de trop grandes fluctuations de vitesse, s'il est trop lourd, la prise de régime ne s'établit pas assez vite, et surtout tout dérangement intempestif dans la marche du moteur est trop lent à disparaître, la liaison synchronisante étant trop lâche. Aussi dans le chronographe Chrétien et Ditisheim a-t-on préféré, en vue de la suppression du volant, doubler le dispositif de synchronisation.

Celui-ci comporte donc deux moteurs synchronisés analogues

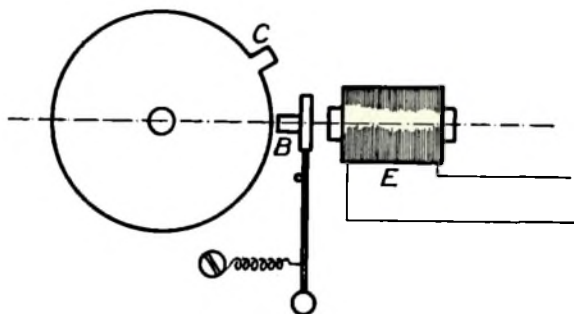


Fig. 87.

à celui que nous devons de décrire, mais réglés automatiquement de telle sorte que :

a) Pour chacun d'eux la phase d'accélération et celle de ralentissement soient d'égale durée.

b) Ces moteurs fonctionnent en opposition de phase, de sorte que l'un s'accélère quand l'autre se ralentit.

Au moyen d'un train différentiel on recueille la vitesse moyenne de ces deux moteurs et l'on obtient ainsi pour les rouleaux imprimants une marche extrêmement constante.

3° Signalons enfin un dispositif de synchronisation souvent employé (ancien chronographe de la Société Genevoise).

Moyennant un choix convenable de ses caractéristiques électriques ou en le dotant d'un régulateur à force centrifuge, on s'arrange pour que le moteur d'entraînement tourne un peu trop vite, l'excès de vitesse étant de l'ordre de 0,5 p. 100. Ce moteur entraîne par friction un tambour (fig. 87) inscrivant les

centièmes de seconde et portant un cran d'arrêt C ; enfin une butée B solidaire de l'armature d'un électro E excité par la pendule garde-temps s'efface pendant un court instant au début de chaque seconde. La butée ne laissant au goujon C le libre passage qu'au début de chaque seconde, il est clair qu'à chaque tour le tambour numéroteur sera bloqué pendant un court instant, la durée de l'arrêt dépendant des fluctuations inévitables de la vitesse du moteur, mais restant toujours de l'ordre du $\frac{1}{200}$ de seconde. La synchronisation aura donc été obtenue, l'impression de l'heure étant assurée au centième de seconde.

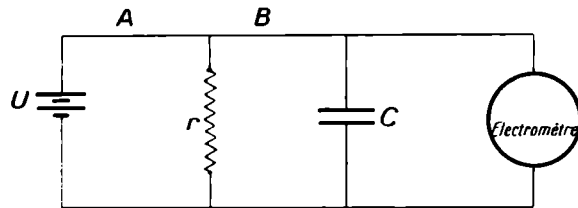


Fig. 88.

4° La description de ces chronographes synchronisés nous amène maintenant à dire quelques mots d'autres dispositifs électriques qui concurremment avec les précédents permettent la mesure de petits intervalles de temps.

a) *Emploi du condensateur shunté.* — Lorsqu'un condensateur de capacité C se décharge dans une grande résistance r la tension u à ses bornes se déduit de la relation

$$\frac{u}{r} dt = -C du,$$

d'où

$$t = Cr \log \frac{U}{u}$$

en désignant par t la durée de la décharge et par U la tension de la pile.

On peut donc déterminer t si l'on mesure C, r, U et u.

Le montage adopté sera par exemple celui de la figure 88.

Au début du phénomène on coupe le fil A. A la fin on coupe le fil B.

Soient par exemple :

$$\frac{U}{u} = 2 \quad r = 6.000\omega \quad C = 1 \mu F.$$

$$t = 6.000 \times 10^{-6} \times 0,301 \times 2,30 = 0,00415 \text{ seconde.}$$

Pour des valeurs plus faibles de t , il suffit de diminuer r .

Ce phénomène a été utilisé industriellement dans le chronographe Dubois ; les armatures du condensateur sont reliées respectivement au filament et à la grille d'une triode ; les lectures sont faites sur un milliampèremètre inséré dans le circuit-plaque et directement gradué en millièmes de seconde ; il faut évidemment que le circuit de grille soit bien isolé, mais avec de bons diélectriques, une triode sélectionnée et un condensateur à haut isolement, on peut obtenir que l'aiguille reste immobile pendant une dizaine de minutes.

Ce chronographe a été utilisé pour la police des routes car il permet de mesurer immédiatement et de transmettre à distance la vitesse d'une automobile ; pour cela, on dispose perpendiculairement à la route, à quelques mètres de distance, deux faisceaux de lumière visible ou infra-rouge que l'on reçoit dans des cellules photoélectriques. L'avant de la voiture coupe successivement les deux faisceaux lumineux, ce qui provoque le fonctionnement de deux relais et permet de mesurer le temps qui s'est écoulé entre leur fonctionnement. On a pu ainsi, avec une base de 5 mètres et sans commettre une erreur supérieure à 1 kilomètre, mesurer la vitesse de voitures roulant entre 30 et 120 kilomètres à l'heure.

Ce chronographe a également servi à mesurer l'altitude des avions par la méthode de l'écho : l'avion émet une note musicale brève qui se réfléchit sur le sol ; le chronographe enregistre le temps qui s'est écoulé entre le départ du son et l'arrivée de l'écho. On a pu ainsi, malgré le bruit intense des moteurs, sonder

entre 3 mètres et 300 mètres d'altitude et obtenir directement sur un graphique, en utilisant un milliampèremètre enregistreur, une vue en profil de la route suivie par l'avion.

b) *Emploi du fluxmètre.* — La déviation de cet appareil est proportionnelle à la quantité d'électricité qui l'a traversé. Intercalons-le dans un pont de Wheatstone équilibré (fig. 89) et pour simplifier les calculs, supposons que tous les côtés et toutes les diagonales ont la même résistance r . Rompons au début du phénomène la branche A du pont, à la fin du phénomène la branche B. Soit α la déviation.

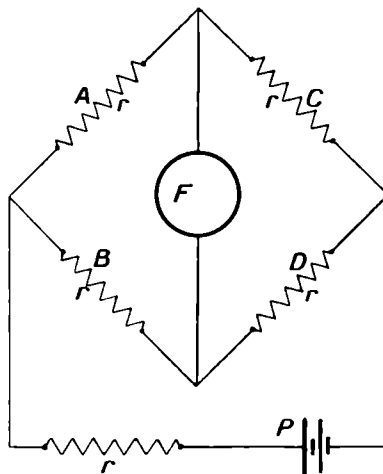


Fig. 89.

Pendant toute la durée de ce phénomène, le fluxmètre est parcouru par un courant égal à :

$$I = \frac{U}{r + r + \frac{2}{3}r} \times \frac{1}{3} = \frac{U}{8r}.$$

De la déviation

$$\alpha = kQ = k \cdot \frac{U}{8r} \cdot t$$

on déduit t , connaissant k , U et r .

Le fluxmètre a été employé en temps de guerre, à l'occasion du repérage par le son, pour mesurer la différence de temps que met une onde sonore pour atteindre les deux extrémités d'une base de réception (membranes avec rupteurs). Il peut servir également à mesurer la vitesse d'un obus (passage à travers deux cerceaux contenant les fils A et B).

49. Horloge parlante. — Comme dernier appareil utilisant des moteurs électriques synchronisés, nous allons décrire une horloge parlante.

La diffusion de l'heure peut, comme nous l'avons déjà dit, se faire par téléphone, mais pour que ce système puisse connaître la faveur du public, il est nécessaire que son fonctionnement soit entièrement automatique et que l'heure soit énoncée en langage clair, non en signaux télégraphiques toujours incommodes à interpréter.

C'est dans ce but qu'a été réalisée à l'Observatoire de Paris une « Horloge parlante » qui, reliée par trente circuits de conversation au réseau « automatique » parisien permet à chaque abonné de connaître, sans déranger personne, l'heure exacte à une fraction de seconde près.

Cette horloge annonce l'heure toutes les 10 secondes, par exemple « 9 heures, 13 minutes, 20 secondes », puis un top musical est émis à l'heure exacte par une pendule de précision. A chaque minute ronde, l'annonce est un peu différente : « au troisième point, dit l'horloge, il sera exactement 9 h. 14 m. », puis trois top musicaux sont émis aux secondes 58, 59 et 60.

Pour obtenir ce résultat, il a fallu faire appel à un reproducteur phonographique capable d'assurer sans usure sensible un service très dur ; le disque phonographique ordinaire trop peu résistant a été naturellement écarté, et on s'est arrêté à la solution du film parlant convenablement modifiée.

On sait que dans les installations usuelles de cinématographie sonore le film passe derrière une fente très étroite de quelques centièmes de millimètre de largeur vivement éclairée et que la lumière qui traverse cette fente est après modulation par le film reçue sur une cellule photoélectrique. Pour éviter le frottement du film contre les parois de la fente et l'usure qui en résulterait à la longue, on a dû dans l'horloge parlante adopter un autre mode d'éclairage ; on projette sur le film l'image rectiligne d'un filament de lampe à incandescence. Mais il faut dans ces conditions obtenir une image très fine et très nette, ce qui exige une mise au point très précise et par conséquent une dis-

tance invariable entre la partie optique et le film lui-même ; il a donc fallu enrouler le film sur un cylindre tournant usiné avec précision. Et enfin comme la réalisation d'un tel cylindre en matière transparente, en verre par exemple, eût été une opération trop délicate on a renoncé à opérer en lumière transmise pour utiliser la lumière diffusée par le film. L'organe essentiel de la pendule est donc un cylindre d'aluminium tourné avec soin portant 90 gorges (24 pour les heures, 60 pour les minutes, 6 pour les dizaines de seconde) divisées en trois séries ; dans ces gorges on a collé un tirage sur papier photographique de la piste sonore d'un film parlant réalisé au préalable.

Ce cylindre, dont la rotation est assurée par un moteur électrique à tension constante synchronisé par une pendule de précision, entraîne *a)* un jeu de cames et de leviers, *b)* un distributeur.

a) Le jeu de cames déplace parallèlement à l'axe du cylindre et de telle manière que chacun d'eux se trouve à chaque instant en face de l'enregistrement qu'il doit reproduire trois reproducteurs (un pour les heures, un pour les minutes, un pour les dizaines de secondes) ; chacun de ces reproducteurs comprend une lampe à filament rectiligne, un objectif qui projette sur le film l'image de ce filament, et enfin une cellule photoélectrique qui recueille la lumière diffusée par le film ; un seul amplificateur est prévu, qui est utilisé à tour de rôle par chacun de ces reproducteurs.

b) Le distributeur tournant donne successivement la parole à chacun de ces reproducteurs pour obtenir l'annonce des heures, des minutes, puis des dizaines de seconde ; le courant obtenu amplifié dans un amplificateur à triodes est finalement envoyé dans les circuits téléphoniques.

Les trente circuits téléphoniques mis à la disposition de cette horloge parlante sont, dans la journée tout au moins, presque constamment utilisés ; on voit que cette horloge parlante a permis non seulement de distribuer d'une manière entièrement automatique l'heure exacte, mais encore qu'elle constitue pour l'Administration des P. T. T. une source certaine de revenus.

CHAPITRE VI

COMPTEURS D'IMPULSIONS

Il existe enfin des horloges réceptrices qui, ne possédant aucune période propre, fonctionnent uniquement comme compteurs d'impulsions. Suivant la nature de celles-ci nous distinguerons :

- Les récepteurs « demi-minute » (impulsions discontinues) ;
- Les horloges à moteur synchrone (impulsions sinusoïdales).

I. — DISTRIBUTION DEMI-MINUTE

50. Fonctionnement et avantages. — Dans ce système de distribution une pendule mère envoie chaque demi-minute dans toutes les réceptrices le courant fourni par une pile. La durée de ce courant étant relativement courte (de l'ordre de 1 seconde), son intensité peut être choisie assez élevée sans que la consommation soit exagérée ; il est donc facile de réaliser des récepteurs robustes, puissants et bon marché convenant tout spécialement :

Aux grands cadrans placés à l'extérieur et soumis aux intempéries, ainsi qu'aux horloges sujettes à de très fortes trépidations, par exemple à celles qui sont suspendues par des chaînes ou placées sur des navires.

Aux appareils nécessitant pour leur fonctionnement une quantité d'énergie relativement considérable (enregistreurs de présence, sonneries, carillons, sirènes).

Enfin aux installations comportant beaucoup de cadrans peu éloignés, le prix de la canalisation étant alors suffisamment faible pour ne pas rendre illusoire l'économie réalisée sur l'achat des récepteurs.

Les réseaux de distribution d'heure établis sur ce principe peuvent fonctionner pendant des mois entiers sans surveillance aussi bien qu'une installation de sonnerie, et donnent toute satisfaction aux usagers (1). Nous donnerons d'abord quelques détails sur les récepteurs.

51. Récepteurs. — 1^o Les premiers compteurs d'impulsions (fig. 90) comportaient une roue à rochet R, un cliquet moteur C, un sautoir S, un électro-aimant ordinaire E et un ressort r.

A chaque émission de courant envoyée par une pendule mère le cliquet solide de l'armature de l'électro-aimant faisait avancer le rochet d'une dent ; aussitôt après le ressort r ramenait l'armature à sa position primitive, tandis que le sautoir S empêchait le rochet de revenir en arrière.

Mais le fonctionnement de ces compteurs était défectueux ; lorsque le contact de la pendule mère n'était pas franc, lorsque, par suite de vibrations par exemple, une émission normale de courant était remplacée par plusieurs émissions de durée plus courte, le rochet pouvait avancer de plusieurs dents au lieu d'une seule et la pendule réceptrice avançait.

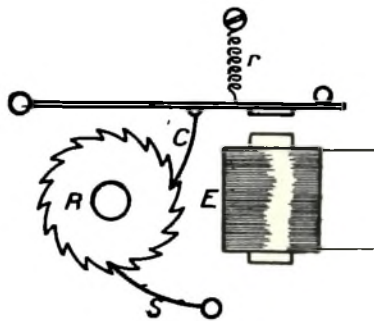


Fig. 90.

(1) Pour mesurer les progrès accomplis depuis les premiers temps de l'horlogerie, il suffit de rappeler les soins continus que nécessitaient les anciennes pendules. Lorsque Henri de Vic installa en 1370 au palais de Charles V son horloge à sonnerie célèbre entre toutes, on le logea, avec de magnifiques appointements, dans une dépendance de l'horloge ; malgré une surveillance constante, l'écart de marche atteignait souvent 1 heure par jour.

Pour éviter ces inconvénients on a dû renoncer aux électro-aimants ordinaires et adopter exclusivement des électro-aimants polarisés dépourvus de ressorts antagonistes et dont l'armature ne se déplace que lorsque le courant est inversé ; de la sorte les

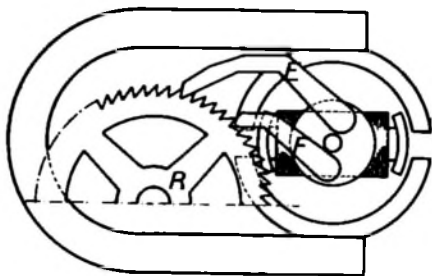


Fig. 91.

mauvais contacts n'ont plus aucune influence sur le mouvement du cliquet qui ne peut agir sur le rochet qu'à chaque inversion de courant.

2° Les récepteurs peuvent être soit à bobine mobile (Ato, Brillié, Lepaute), soit à aimant mobile (Bardon).

Les premiers (fig. 91) comportent une bobine à noyau de fer mobile dans le champ d'un aimant permanent. Au moment de l'inversion du courant, cette bobine change brusquement de position ; elle est ensuite mainte-

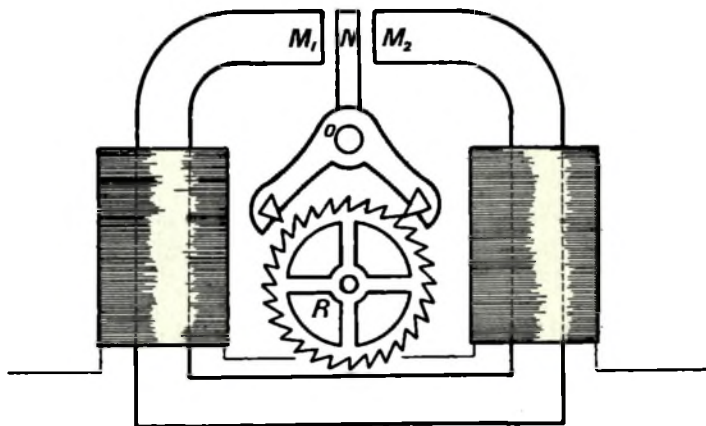


Fig. 92.

nue en place par le magnétisme rémanent. Ce mouvement alternatif est transformé en une rotation continue de la roue R par un système de deux cliquets E et F.

3° Les récepteurs à aimant mobile (fig. 92) sont basés sur un principe un peu différent :

Entre les pièces polaires M_1 et M_2 de l'électro-aimant peut se déplacer l'extrémité supérieure N d'un aimant permanent mobile autour du point O. Lorsque cet électro reçoit des émissions successives de sens inverses, l'équipage mobile est sollicité tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre et, agissant sur la roue d'ancre R, il commande par l'intermédiaire d'une minuterie appropriée les aiguilles d'heures et de minutes.

Il est à peine besoin de faire remarquer qu'en raison de l'espace des émissions et de la lenteur du mouvement des rouages, ces récepteurs sont pratiquement inusables.

4° Les mouvements précédents peuvent être utilisés, à condition naturellement d'employer des électros de dimensions suffisantes, pour actionner des horloges d'édifice. Cependant l'expérience ayant montré que le couple résistant augmente sensiblement comme le cube de la longueur des aiguilles, on serait rapidement arrêté au delà d'une certaine limite par l'encombrement des organes et la consommation de courant. Aussi a-t-on généralement recours, lorsque le diamètre du cadran dépasse 2 mètres, à un moteur rotatif de type normal qui peut évidemment entraîner sans difficulté les aiguilles les plus lourdes. Ce moteur est asservi à une réceptrice horaire ordinaire au moyen de contacts qui le mettent en marche périodiquement et synchronisent les aiguilles de la grande horloge sur celles de la pendulette-relais.

On peut utiliser, par exemple, un dispositif analogue à celui de la figure 93 et qui a l'avantage en cas de panne du secteur de permettre le rattrapage de l'heure : un doigt A fixé sur la roue menante B (entraînée par la pendulette) peut frotter pour certaines positions contre un secteur C porté par la roue menée D solidaire de

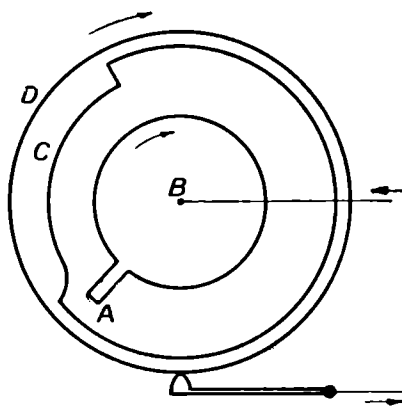


Fig. 93.

l'horloge. Lorsque partant de la position indiquée sur la figure (position d'attente) la roue B tourne dans le sens de la flèche de $\frac{1}{60}$ de tour, le contact se trouve établi ; le moteur se met alors en marche et entraîne la roue D dans le même sens jusqu'à ce que celle-ci ayant également tourné de $\frac{1}{60}$ de tour le contact se rompe à nouveau.

L'installation de ces mouvements électriques est beaucoup plus facile et moins encombrante que celle des horloges monumentales ordinaires. Plus de puits à prévoir pour les poids, aucun danger de chute de ces derniers, suppression d'une grande partie des tringleries et, évidemment, absence de remontage.

5° Les pendules réceptrices sont le plus souvent montées en série, chacune d'elle étant d'ailleurs shuntée par une résistance de sécurité ; cette disposition évite l'arrêt de l'installation complète dans le cas où une interruption de circuit se produirait dans une réceptrice particulière tout en supprimant les effets de l'extra-courant de rupture. A titre de renseignement, les réceptrices normales Ato sont shuntées par une résistance de 11 ohms ; les réceptrices Garnier absorbent 70 milliampères sous 0,2 volt.

52. Horloge mère. — L'émission de courants inversés est assurée toutes les demi-minutes par l'horloge mère.

1° Dans le système Ato que nous citerons comme premier exemple on utilise un commutateur rotatif (fig. 94) qui fait un tour par minute et joue en même temps le rôle de trotteuse. Un des fils de la canalisation est relié à un bras métallique B, muni à son extrémité d'une garniture en or ; les pôles extrêmes de la pile sont respectivement reliés à deux goupilles platinées gg' diamétralement opposées et portées par des ressorts RR' . Le courant ne passe (dans un sens ou dans l'autre suivant les cas) que lorsque le bras B vient frotter contre l'une de ces goupilles.

Une came isolée C tournant dans le sens de la flèche prépare et régularise le contact en soulevant progressivement au moment convenable les ressorts R et R'.

Les dimensions du bras frotteur et des goupilles ont été choi-

sies telles que la durée du contact soit de 1 seconde; ce temps est largement suffisant pour assurer le fonctionnement correct des réceptrices; un contact plus prolongé ne ferait qu'augmenter l'usure de la pile.

2^o Dans les horloges distributrices Bardon, la roue de centre comporte un levier qui vient agir alternativement sur deux autres leviers commandant le basculage de deux interrupteurs à mercure; ceux-ci sont ensuite ramenés par leur propre poids à leur position de repos.

La présence sur la pendule mère de ces interrupteurs à mercure pouvant supporter quelques ampères permet d'actionner sans l'intermédiaire de relais un grand nombre de réceptrices et de les monter en dérivation.

3^o La source de courant est en général une batterie de piles; le nombre et la dimension de celles-ci dépendent évidemment du nombre et de la nature des récepteurs à alimenter; pour fixer l'ordre de grandeur, voici un exemple relatif à une petite installation courante (montage série).

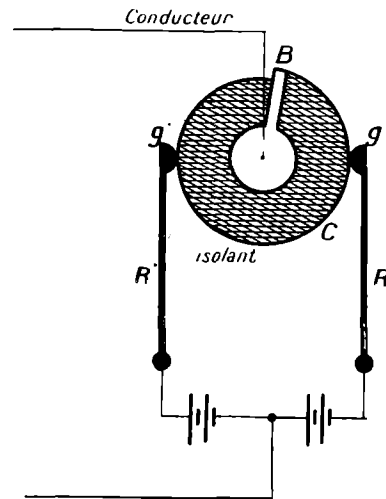


Fig. 94.

4 cartels à 0,4 volts	1,6
1 pointeuse	4
1 mécanisme de sonnerie	2,5
150 mètres de ligne	1
Total	<u>9 volts</u>

Mais dans les installations très importantes, on adopte de préférence une batterie d'accumulateurs spécialement étudiée pour fonctionner à un régime lent, c'est-à-dire possédant des lames épaisses, une grande réserve d'électrolyte et une faible acidité.

Cette batterie est montée en tampon sur un chargeur constitué par un redresseur sec à oxyde de cuivre réglé de manière à fournir une intensité à peine supérieure à celle que nécessite l'installation ; l'ensemble ne demande pratiquement aucun entretien et peut alimenter indéfiniment un nombre considérable de récepteurs.

53. Remise à l'heure. — Le système de distribution demiminute étant particulièrement utilisé pour les horloges monumentales, il est indispensable de prévoir un dispositif de remise à l'heure général sans qu'on soit obligé d'agir en particulier sur les aiguilles de chaque réceptrice.

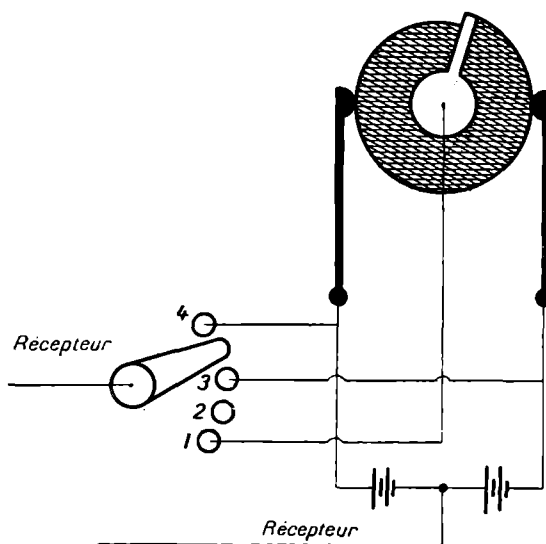


Fig. 95.

On utilise pour cela le commutateur à quatre directions représenté sur la figure 95. Dans la position 1, l'installation fonctionne normalement. Dans la position 2 le circuit des réceptrices est interrompu et les aiguilles arrêtées, ce qui permet le cas échéant de remédier à une avance. Enfin, en promenant d'un mouvement alternatif la manette du commutateur sur les plots 3 et

4 et en marquant un léger temps d'arrêt sur chacun d'eux, on produit dans les réceptrices des inversions du courant et l'on fait avancer leurs aiguilles à une cadence accélérée.

Un problème analogue se pose pour la distribution de l'heure sur les navires ; comme il est nécessaire de modifier l'heure chaque fois que l'on change de fuseau horaire et qu'il est impossible de faire cette opération à la main sur chaque réceptrice (un paquebot peut en porter plusieurs centaines) on prévoit un dispositif automatique chargé d'envoyer, lorsqu'il est déclenché, le nombre d'émissions nécessaires ; souvent même les réceptrices employées peuvent tourner dans les deux sens, ce qui permet de les retarder facilement ; quant à l'horloge mère, elle possède évidemment un balancier circulaire insensible aux oscillations du navire.

II. — PENDULES SYNCHRONES

Enfin, la diffusion de l'heure peut être réalisée au moyen de pendules à moteurs synchrones par les réseaux de distribution électrique qui prennent soin de maintenir leur fréquence rigoureusement invariable (1).

54. Stabilisation de la fréquence des réseaux électriques.

— 1^o Aux Etats-Unis, 90 p. 100 de ces réseaux ont stabilisé leur fréquence et 5 millions d'Américains usent déjà de la distribution d'heure à domicile. En France, les horloges à moteurs synchrones sont beaucoup moins répandues et parmi les centrales de province, seules celles de Nantes et de Nevers contrôlent la fréquence de leur courant ; cependant la région parisienne est déjà tout entière desservie à fréquence constante et les deux mil-

(1) La première distribution d'heure par moteurs synchrones date de 1899 (Thury) ; la pendule mère était une commutatrice triphasée alimentée en courant continu et maintenue à vitesse constante par un pendule conique. L'alimentation de pendules synchrones par le réseau d'éclairage a été réalisée pour la première fois en 1916 (Edison Electric Illuminating Company de Boston).

lions d'usagers que comptent Paris et sa banlieue pourraient dès aujourd'hui utiliser des horloges synchrones.

Rien de plus facile pour une usine génératrice autonome que de stabiliser sa fréquence. Il suffit pour cela de placer côte à côte, au tableau général de commande, une horloge astronomique et une horloge synchrone actionnée par le courant produit. Si les deux pendules marquent exactement la même heure, le mécanicien de service laisse les choses en l'état ; mais si la pendule synchrone retarde il accélère la marche des turbines, si elle avance il agit en sens inverse.

On emploie dans certaines usines des horloges plus complexes possédant sur un même cadran deux aiguilles, conduites l'une par le garde-temps, l'autre par l'horloge synchrone, ou encore une seule aiguille actionnée par un différentiel et indiquant directement l'avance ou le retard de l'heure distribuée par rapport à l'heure astronomique.

Enfin, dans les installations encore plus perfectionnées, la régulation de la fréquence est automatique, un dispositif de contacts établi par l'aiguille de l'indicateur d'avance agissant par l'intermédiaire de relais appropriés sur le régulateur de vitesse des turbines.

Mais dès qu'il s'agit de réseaux de quelque importance comportant de nombreuses centrales interconnectées, la stabilisation de la fréquence devient un problème très complexe ; c'est qu'en effet l'ouverture exagérée d'une vanne de vapeur n'a plus sur la fréquence du réseau qu'une influence négligeable tandis qu'elle a au contraire pour effet immédiat de surcharger le groupe générateur correspondant.

2° L'interconnexion générale de tous les réseaux et la stabilisation de leurs fréquences ne peuvent donc se réaliser que lentement, et ce n'est certes pas la perspective de trouver dans l'horlogerie électrique un supplément de recettes qui poussera les compagnies de distribution électrique à s'engager résolument dans cette voie. Certes, les horloges synchrones sont par leur essence même des récepteurs à utilisation constante, marchant vingt-quatre heures par jour, mais leur puissance est très faible

(1 à 2 watts aujourd'hui, certainement moins dans l'avenir), souvent insuffisante pour faire démarrer un compteur, avec un $\cos \varphi$ exceptionnellement mauvais. Et de plus, seules parmi tous les récepteurs elles réclament une fréquence rigoureusement stabilisée. Il ne faut pas perdre de vue en effet qu'il existe déjà bon nombre de moteurs synchrones beaucoup moins exigeants : pour enregistreurs, pour compteurs à tarifs multiples, pour allumeurs-extincteurs automatiques de magasins ou de distributions urbaines, pour interrupteurs de chauffage par accumulation aux heures de pointes, pour bobinages à vitesse constante, pour phonographes, tous appareils dont la marche est déjà satisfaisante sur les réseaux actuels et dont le fonctionnement ne souffre guère d'un retard de quelques minutes.

3° En ce qui concerne l'inconvénient d'une interruption de courant, la généralisation du système d'interconnexion des différents réseaux rend les accidents plus rares. Restent toujours possible cependant les courts-circuits locaux et les coupures de courant volontaires sur l'ensemble de l'installation que certains usagers pratiquent fréquemment, les jours de fête en particulier, pour des raisons de sécurité.

55. Moteurs polarisés. — Les mouvements de pendules synchrones peuvent être classés en plusieurs catégories suivant qu'ils possèdent ou non :

- Des aimants permanents,
- Un démarrage automatique,
- Une réserve de marche.

Nous nous occuperons d'abord de moteurs polarisés dans lesquels on n'a prévu aucun dispositif de démarrage ou de réserve de marche.

1° **Théorie.** — Ils sont analogues aux moteurs synchrones industriels employés dans les transports d'énergie à grande distance, mais évidemment de dimensions beaucoup plus réduites. Ils comportent un stator feuilleté (fig. 96) recevant le courant du réseau et un rotor constitué par un aimant permanent. Lorsque

le rotor tourne au synchronisme, et entre certaines limites de déphasage, il peut fournir de l'énergie mécanique.

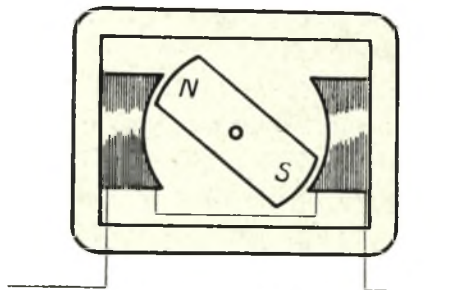


Fig. 96.

Raisonnons pour simplifier sur un moteur bipolaire (fig. 97) et désignons par :

U la tension d'alimentation.

E la force contre-électromotrice, c'est-à-dire la tension alternative que

donnerait l'appareil si on le faisait tourner à la même vitesse comme alternateur.

R et L la résistance et la self du stator.

θ le décalage mécanique du moteur sur l'alternateur qui le conduit ou, ce qui revient au même, le déphasage électrique de E sur U.

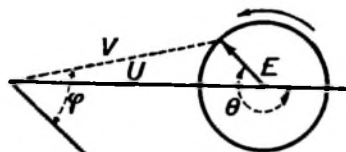


Fig. 97.

Dans le circuit du moteur, la force électromotrice agissante est la résultante V de U et de E ; l'intensité absorbée I a donc pour valeur :

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}}$$

et est déphasée sur le vecteur V d'un angle φ tel que :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L \omega}{R}.$$

Les puissances mises en jeu s'évaluent facilement sur le graphique :

Puissance absorbée par le moteur : $I \times$ projection de U sur I.

Puissance perdue par effet Joule : $I \times$ projection de V sur I.

Puissance mécanique : $I \times$ projection de E sur I.

Comment varient ces puissances lorsque, le moteur étant couplé au synchronisme, nous le freinons progressivement ?

Tout d'abord, par suite des faibles dimensions du rotor, E reste dans ces moteurs (1) toujours très inférieur à U . Conséquence : la force électromotrice résultante V diffère peu de la tension U du réseau, l'intensité absorbée reste sensiblement constante en grandeur et en phase, enfin, le rendement est toujours très faible.

Ce qui varie lorsqu'on modifie le couple résistant, c'est l'angle θ puisque la puissance mécanique a pour expression :

$$EI \cos (\theta - \varphi)$$

et que E , I et φ sont constants.

A vide E est perpendiculaire à I , et θ est égal à $\frac{\pi}{2} + \varphi$; en charge le moteur se retarde, θ augmentant de telle manière que E et U se projettent sur I en sens inverse ; lorsque θ a dépassé la valeur $\pi + \varphi$ qui correspond au parallélisme de E et de I le moteur se décroche ; les autres valeurs de θ correspondent soit à des régimes moteurs instables, soit à la marche en génératrice.

Le maximum de puissance disponible se produit donc lorsque, à partir de la marche à vide, le rotor s'est retardé de $\frac{\pi}{2}$; ce maximum a pour valeur EI et le rendement correspondant est $\frac{E}{U \cos \varphi}$.

APPLICATION NUMÉRIQUE. — Voici quel est dans les modèles ordinaires de pendulettes l'ordre de grandeur des quantités précédentes :

$$\begin{aligned} U &= 110 \text{ volts,} \\ I &= 0,01 \text{ ampère,} \\ \varphi &= 45^\circ, \\ E &= 0,1 \text{ volt,} \end{aligned}$$

(1) Par hypothèse, nous supposons que le vecteur E est sinusoïdal ; s'il ne l'était pas, d'ailleurs, les conclusions de notre calcul resteraient encore valables, car l'intensité étant sinusoïdale, les harmoniques de la force contre-électromotrice ne peuvent produire aucune puissance.

ce qui donne pour la puissance mécanique maxima : 1 milliwatt et pour le rendement maximum : 0,13 p. 100.

2° Démarrage. — Ces moteurs ne démarrent pas d'eux-mêmes et demandent à être lancés, à la main, à une vitesse voisine de celle du synchronisme ; le vecteur E tourne alors assez lentement par rapport à l'ensemble de la figure et le couple garde pendant assez longtemps un signe constant pour que, après quelques oscillations, l'accrochage puisse se produire.

Pour permettre le lancement à la main on peut tout simplement disposer sur l'axe du rotor un bouton moleté que l'on fait tourner à la main. Mais il est préférable pour obtenir au lancement une vitesse mieux définie de charger du démarrage un ressort préalablement tendu par un levier ; ce ressort agit par exemple sur une crémaillère qui engrène avec un pignon porté par l'arbre ou encore sur un bec qui pénètre entre les dents du rotor.

3° Réalisation. — Alimenté sous 50 périodes, le moteur précédent tournerait à raison de 50 tours par seconde, ce qui entraînerait une grande complication dans le rouage et de grosses difficultés pour le graissage ; aussi, en pratique, construit-on de préférence des moteurs multipolaires.

Le moteur Cottna a par exemple 20 paires de pôles au stator, ce qui réduit la vitesse à 2,5 tours-seconde ; pour faciliter la construction de l'aimant rotorique et pour s'opposer à sa désaimantation spontanée, on a supprimé un certain nombre de pôles, au détriment de la puissance naturellement.

Les caractéristiques de ce moteur sont les suivantes :

Tension d'alimentation : 110 volts.

Intensité absorbée : 8 milliampères.

Puissance absorbée : 0,55 watt.

Facteur de puissance : 0,65.

Puissance maxima utilisable : 0,5 milliwatt.

56. Moteurs non polarisés. — Ce sont des moteurs à « roue de fer » ou à « inductance variable ».

1^o **Théorie.** — Nous savons qu'une self-inductance *constante*, sans résistance, absorbe sous une tension sinusoïdale

$$u = U \sqrt{2} \sin \omega t,$$

un courant également sinusoïdal

$$i = \frac{U \sqrt{2}}{L \omega} \cos \omega t$$

qui ne correspond à aucune puissance wattée.

Nous en déduisons immédiatement qu'une self-inductance *variable* alimentée sous tension sinusoïdale ne peut pas absorber un courant purement sinusoïdal ; s'il y a production de puissance mécanique, celle-ci ne pourra être fournie que par les harmoniques et par suite sera relativement peu importante.

Supposons que le circuit magnétique d'une bobine (fig. 98) se déforme périodiquement à la fréquence $\frac{\omega'}{2\pi}$. Sa réluctance peut se mettre sous la forme

$$\mathcal{R} = a + b \cos \omega' t,$$

en négligeant les harmoniques supérieurs (dont on peut d'ailleurs réduire suffisamment l'amplitude en choisissant convenablement le profil des tôles) ; son inductance l qui varie en sens inverse a pour valeur

$$l = \frac{k}{\mathcal{R}},$$

k étant une constante qui dépend du nombre de spires.

Alimentons cette bobine, dont nous supposons pour simpli-

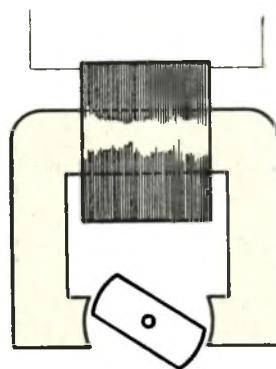


Fig. 98.

fier la résistance négligeable, sous une tension sinusoïdale de valeur efficace constante U et de fréquence $\frac{\omega}{2\pi}$

$$u = U \sqrt{2} \sin (\omega t + \theta).$$

L'intensité absorbée est donnée par l'équation :

$$u = \frac{d\phi}{dt} = \frac{d}{dt}(li),$$

d'où :

$$\begin{aligned} i &= \frac{\mathcal{R}}{k} \int u \, dt \\ &= \frac{1}{k\omega} \cdot U \sqrt{2} \cdot \cos (\omega t + \theta) (a + b \cos \omega' t). \end{aligned}$$

La puissance instantanée a pour valeur :

$$\begin{aligned} w = ui &= U \sqrt{2} \sin (\omega t + \theta) \cdot \frac{U \sqrt{2}}{k\omega} \cos (\omega t + \theta) (a + b \cos \omega' t) \\ &= \frac{aU^2}{k\omega} \sin 2(\omega t + \theta) + \frac{bU^2}{2k\omega} [\sin (2\omega t + \omega' t + 2\theta) + \sin (2\omega t - \omega' t + 2\theta)]. \end{aligned}$$

Pour avoir la puissance moyenne W il suffit de faire la moyenne de w pendant un grand nombre de périodes ; dans ce calcul les termes contenant les lignes trigonométriques du temps disparaissent, de sorte que W est nul en général. Cependant pour la valeur particulière $\omega' = 2\omega$ le dernier terme ne contient plus le temps et W a pour expression :

$$W = \frac{bU^2}{2k\omega} \sin 2\theta.$$

Pour qu'une inductance variable puisse constituer un moteur, il faut donc qu'elle varie deux fois plus rapidement que la tension d'alimentation, c'est-à-dire dans le cas de la figure que le rotor tourne à la fréquence de la tension d'alimentation (tout comme pour le moteur synchrone de la page 152).

Comme le montre la formule précédente, la puissance mécanique disponible dépend de l'angle θ ; lorsque le moteur tourne à vide, c'est-à-dire pour $W = 0$ on a $\theta = 0$, c'est-à-dire que l'armature est en croix avec les pièces polaires au moment où la tension est nulle ; quand on freine le moteur, θ augmente ; pour $\theta = 45^\circ$, le couple moteur passe par un maximum ; enfin pour des valeurs supérieures de θ le fonctionnement est instable et le moteur se décroche.

La puissance maxima a donc pour valeur :

$$W_{\max.} = \frac{bU^2}{2k\omega}.$$

Il nous est facile de mettre cette expression sous une forme plus commode, dans le cas habituel où b est petit vis-à-vis de a . Désignons en effet par I_1 et I_2 les valeurs maxima et minima de l'intensité efficace absorbées par le moteur lorsqu'on le maintient immobile dans toutes les positions successives. Nous avons :

$$I_1 = \frac{U(a+b)}{k\omega} \quad I_2 = \frac{U(a-b)}{k\omega},$$

d'où :

$$W_{\max.} = \frac{1}{4} U(I_1 - I_2).$$

Dans les petits moteurs de pendules, l'intensité absorbée sous 110 volts est de l'ordre de 50 milliampères, le déphasage φ de 45° et la différence $I_1 - I_2$ de 1 milliampère.

La puissance maxima utilisable est dans ces conditions (1) d'une trentaine de milliwatts et le rendement voisin de 0,5 p. 100.

2° Réalisation. — En pratique, on utilise des appareils multipolaires qui ont l'avantage de tourner à des vitesses relativement faibles.

(1) Rappelons que nos formules supposent une résistance négligeable et une réluctance sinusoïdale ; pour des tôles de profil quelconque et une résistance importante elles peuvent ne donner qu'une grossière approximation.

Le moteur Eltime a par exemple pour rotor un disque de fer portant à sa circonférence 20 dents et qui par suite ne tourne qu'à raison de 5 tours par seconde. Le stator est une simple tôle excitée par une bobine et dont chaque pièce polaire comporte cinq dents réparties sur un quart de circonférence.

Le rouage est particulièrement simple : trois vis sans fin et une minuterie ; lorsque cette pendulette est équipée en réveil, l'organe principal de celui-ci est une lame vibrante en acier susceptible d'entrer en résonance sous l'action des fuites magnétiques du moteur. Normalement cette lame est maintenue à une distance suffisante par une came, mais celle-ci qui est entraînée par la minuterie dégage à l'heure voulue la lame vibrant alors avec force qui vient heurter le stator en produisant un bruit énergétique ; pour changer l'heure du déclenchement, il suffit de modifier le calage de la came.

Les caractéristiques de ce moteur sont les suivantes :

Tension d'alimentation : 110 volts.

Intensité absorbée : 35 milliampères.

Puissance absorbée : 1,9 watt.

Facteur de puissance : 0,5.

Puissance maxima utilisable : 4 milliwatts.

57. Moteurs auto-démarrateurs. — Pour obtenir une pendule synchrone se mettant en marche d'elle-même, il suffit d'associer deux moteurs ; l'un asynchrone (chapitre 3), l'autre synchrone (paragraphes précédents), ces deux moteurs pouvant d'ailleurs avoir un certain nombre de parties communes.

1° Moteurs bipolaires. — Dans ces moteurs, ce sont les mêmes organes qui servent à assurer le démarrage et la marche en synchronisme.

Ils possèdent par exemple un stator à flux retardé (bagues en cuivre) et un rotor en acier légèrement dissymétrique (deux trous diamétralement opposés) ; ils démarrent comme un moteur à hystérésis et fonctionnent ensuite après l'accrochage comme un moteur synchrone bipolaire.

Ces moteurs présentent l'inconvénient d'avoir une vitesse exagérée (plus d'un milliard de tours par an) ce qui nécessite l'emploi d'un rouage démultiplicateur comportant un grand nombre de mobiles et un graissage parfait. Le plus souvent le train d'engrenages en entier est enfermé dans un carter étanche complètement rempli d'huile minérale ; on obtient ainsi un fonctionnement très doux, mais la fabrication devient alors très compliquée et les réparations pratiquement impossibles.

Voici par exemple les caractéristiques d'un de ces moteurs (moteur Warren) :

Tension d'alimentation : 110 volts.

Intensité absorbée : 20 milliampères.

Puissance absorbée : 1,1 watts.

Facteur de puissance : 0,5

2° Moteurs multipolaires. — a) Pour obtenir une faible vitesse, par exemple deux tours par seconde à la fréquence 50, on pourrait adopter un moteur analogue au précédent et muni de 25 paires de pôles. Mais alors, il faudrait que le stator possédât 100 dents, 100 encoches et 50 bagues, ce qui, à moins de donner aux demi-pôles des dimensions ridiculement petites, exigerait pour le rotor un diamètre excessif. Aussi procède-t-on autrement : pour chacun des deux moteurs élémentaires asynchrone et synchrone dont l'ensemble constitue le moteur auto-démarrreur, on adopte un nombre de pôles nettement différent, par exemple 5 paires pour le premier et 25 paires pour le second ; de la sorte, on n'a plus que 10 pôles à fendre au lieu de 50 et 10 bagues à placer sur le stator, ce qui évidemment facilite beaucoup la construction (en fait on ne place pas ces 10 bagues ; on les remplace (fig. 99) par une seule couronne de cuivre fendue au droit des demi-pôles dont le flux ne doit pas être retardé).

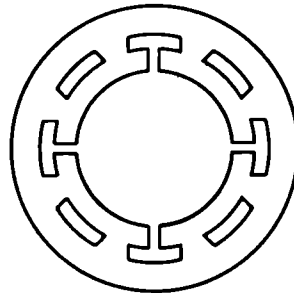


Fig. 99.

Mais cette simplification n'est possible que si l'on a au préalable calculé avec beaucoup de soin les deux moteurs de manière à proportionner convenablement leurs caractéristiques ; sans cela, au moment où le rotor atteindrait sa vitesse normale de deux tours par seconde (sous-synchronisme), il pourrait ne pas s'y fixer et, entraîné par un couple asynchrone exagéré, tendre vers une vitesse cinq fois plus grande.

Pour examiner plus en détail cette question, représentons en fonction de la vitesse (fig. 100) les couples de démarrage et d'ac-

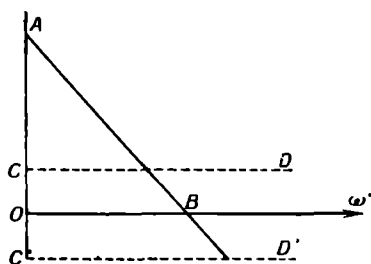


Fig. 100.

crochage. Le premier moteur ayant une faible réaction d'induit (page 92), ce couple est représenté par une droite relativement inclinée AB.

Le second (couple synchrone) dépend à la fois de la vitesse et de la position du rotor ; tout ce que nous savons sur lui, c'est que le point qui le représente à un instant donné se trouve à l'intérieur d'une bande telle que C, D, D', C'.

Pour que le démarrage soit certain, il suffit que AO soit nettement supérieur à OC, dans ces conditions, même si les dents du rotor sont arrêtées juste en face celles du stator, le moteur se mettra en marche dès qu'on appliquera la tension. On pourra toujours obtenir ce résultat en donnant au moteur asynchrone des pôles d'une dimension suffisante.

Pour que le démarrage soit certain, il suffit que AO soit nettement supérieur à OC, dans ces conditions, même si les dents du rotor sont arrêtées juste en face celles du stator, le moteur se mettra en marche dès qu'on appliquera la tension. On pourra toujours obtenir ce résultat en donnant au moteur asynchrone des pôles d'une dimension suffisante.

D'un autre côté, le moteur, après avoir démarré, ne traversera la vitesse de sous-synchronisme sans s'y fixer que si pour cette vitesse le couple asynchrone a une valeur exagérée. Or nous savons que ce couple devient nul (page 92) pour la vitesse :

$$\omega' = \omega \sin \varphi.$$

A condition de diminuer suffisamment φ , c'est-à-dire d'employer des bagues peu épaisses (1) et un rotor assez résistant,

(1) Pour fixer l'ordre de grandeur : le déphasage optimum est de 70° dans les moteurs Westinghouse.

nous pourrions donc obtenir que le couple de démarrage s'annule précisément pour cette vitesse de 2 tours-seconde qui correspond au sous-synchronisme.

Nous serons alors assurés qu'après un certain temps qui dépendra de l'inertie du rotor et des conditions initiales, l'accrochage se produira.

b) Dans le moteur Sangamo (polarisé) la même bobine excite deux circuits magnétiques disposés en série. Le premier de ceux-ci possède une seule paire de pôles, chacun de ceux-ci étant muni sur la moitié de sa surface d'une bague de déphasage ; combiné avec une cloche en aluminium, il constitue un moteur asynchrone (analogue à un moteur à disque) qui permet le démarrage. Le deuxième circuit magnétique, à 15 paires de pôles, agit sur un petit aimant denté solidaire de la cloche, et assure la marche en sous-synchronisme à la vitesse de 200 tours-minute.

Les caractéristiques de ce moteur sont :

Tension d'alimentation : 110 volts.

Intensité absorbée : 30 milliampères.

Puissance absorbée : 2,1 watts.

Facteur de puissance : 0,63.

c) Enfin le moteur synchrone Lip (non polarisé) diffère peu de celui que nous avons déjà décrit page 94 ; le rotor à cage d'écureuil a simplement été remplacé par une cloche en acier munie de 20 dents et assurant la marche sous-synchrone à la vitesse de 5 tours-seconde (1).

Ses caractéristiques sont les suivantes :

Tension d'alimentation : 110 volts.

Intensité absorbée : 25 milliampères.

Puissance absorbée : 0,8 watt.

Facteur de puissance : 0,3.

Puissance maxima utilisable : 4 milliwatts.

d) La puissance des moteurs synchrones est pour ainsi dire illimitée ; aussi peut-on, lorsqu'on dispose d'un secteur à fré-

(1) En réalité le moteur Lip n'est pas auto-démarrreur, mais on a conservé un léger couple asynchrone pour faciliter le démarrage à la main.

quence stabilisée, réaliser, même pour les horloges les plus encombrantes, des équipements électriques d'une remarquable simplicité.

Nous n'entrerons pas dans le détail de ces installations, toutefois, en raison de son originalité, on nous permettra de citer le récepteur Lepaute récemment installé sur la Tour Eiffel et dont les cadrans ne mesurent pas moins de 20 mètres de diamètre.

La Tour Eiffel remplit des fonctions si variées qu'elle relève pratiquement de plusieurs administrations ; la Ville de Paris en est la propriétaire légale, mais l'Autorité militaire et la Préfecture de police ont également des droits sur elle. Bref, lorsqu'il fut question d'installer sur la Tour d'énormes aiguilles métalliques, on ne put en obtenir l'autorisation des Pouvoirs publics.

Devant ce refus, les installateurs durent adopter une autre solution : A la place de l'aiguille des minutes ils ont disposé suivant 60 rayons équidistants d'une circonférence des lignes d'ampoules électriques rouges qu'un contacteur allume l'une après l'autre pendant 1 minute ; ils ont de même remplacé l'aiguille des heures par 24 lignes d'ampoules bleues qui sont mises successivement en service, chacune pendant une demi-heure. Enfin les sonneries classiques sont remplacées par de puissantes projections lumineuses.

L'horloge possède deux cadrans situés à 200 mètres de hauteur, l'un sur la face Nord-Est de la Tour, l'autre sur la face Nord-Ouest. Leur installation électrique ne fut pas une petite affaire et nécessita plus de 17 kilomètres de câble et 6 000 ampoules mais la visibilité en est considérable ; on peut facilement lire l'heure à quelques kilomètres de distance.

Ajoutons que le contacteur qui anime cette horloge la plus grande du monde est manœuvré par un minuscule moteur synchrone qui tiendrait dans le creux de la main.

e) L'auto-démarrage des moteurs est, du point de vue électrique, un perfectionnement important ; il évite en particulier le décrochage dans le cas de perturbations brutales (surtensions, couplages) du réseau d'alimentation ; toutefois, à moins d'être

complété par des dispositifs accessoires permettant son utilisation rationnelle, il ne présente, en cas de panne de courant, aucun avantage sur le lancement à la main.

Le démarrage à la main, en effet, surtout lorsqu'il se fait par l'intermédiaire d'un ressort, ne présente aucune difficulté ; il est rare que l'accrochage ne se produise pas au premier essai. Son seul inconvénient provient des difficultés que l'on rencontre pour atteindre les dispositifs de lancement et de remise à l'heure lorsque la pendule est hors de portée.

En cas d'interruption de courant l'auto-démarrage seul présenterait plutôt des inconvénients ; au moment de la reprise, au lieu de rester arrêtée (ce que l'immobilité de l'aiguille des secondes permettrait de voir facilement) la pendule indique une heure inexacte, et cela sans que l'observateur puisse s'en rendre compte. Aussi, l'auto-démarrage, pour constituer un progrès réel, doit-il être accompagné de deux dispositifs accessoires :

L'un avertissant que l'heure indiquée est inexacte,

L'autre permettant d'assurer à distance la remise à l'heure.

Le premier de ces appareils est constitué par un voyant rouge qui apparaît au bas du cadran en cas de panne de secteur ; il est porté par une pièce de fer normalement retenue par les fuites magnétiques du moteur et qui retombe dès que le courant fait défaut.

Quant au rattrapage de l'heure, il est facile lorsqu'on dispose d'un moteur multipolaire parce qu'on peut alors donner exceptionnellement au couple asynchrone une valeur suffisante pour que le rotor traverse sans s'y arrêter la vitesse normale correspondant au sous-synchronisme ; le procédé le plus simple consiste à court-circuiter au moyen d'un bouton de sonnerie, soit une résistance convenable placée normalement en série avec le moteur, soit un enroulement supplémentaire bobiné sur les demi-pôles à flux retardé.

L'auto-démarrage, même complété par les dispositifs précédents, n'est cependant pas le remède idéal contre les défaillances du réseau ; la vraie solution doit plutôt être cherchée dans la « réserve de marche » dont nous allons maintenant nous occuper.

58. Pendules à réserve de marche. — Pour éviter l'arrêt des aiguilles en cas de panne du secteur, on a proposé d'ajouter à une horloge à moteur synchrone autodémarrreur un mécanisme d'horlogerie complet à ressort pour commander les aiguilles de l'horloge en cas d'interruption de courant.

Cette solution du problème entraîne de grandes difficultés de fabrication sans cependant donner entière satisfaction dans le cas de pannes courtes et fréquentes ; c'est qu'en effet, suivant les dispositifs d'enclenchement utilisés (embrayages, disjoncteurs, différentiels, etc.), la minuterie peut fort bien pendant les premiers instants de la panne n'être actionnée par aucun des

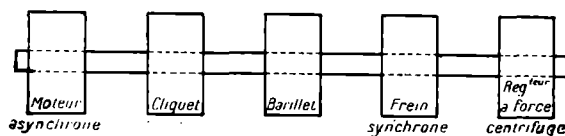


Fig. 101.

mécanismes ou au contraire l'être par tous les deux à la fois, ce qui, au bout d'un certain nombre d'interruptions de courant, a pour conséquence un retard ou une avance appréciables.

Pour éviter cet inconvénient, il faut fusionner d'une manière plus complète les deux mécanismes horaires. Parmi les nombreuses solutions proposées, nous en citerons trois seulement, basées sur des principes entièrement différents.

1^o La pendule Hammond comprend les éléments suivants (fig. 101) :

- 1 moteur asynchrone à cage d'écureuil,
- 1 ressort de barillet assurant la réserve de marche,
- 1 frein magnétique synchrone,
- 1 régulateur à force centrifuge à fonctionnement discontinu.

a) Le frein magnétique synchrone est un appareil à inductance variable identique comme construction aux moteurs que nous avons étudiés page 155 mais dont le couple est ici antagoniste ; sa roue de fer tourne à vitesse rigoureusement constante lorsqu'il est accroché et commande la minuterie. Cette roue est

entraînée au moyen d'un train d'engrenages par la bonde d'un barillet dont l'axe est lui-même entraîné au moyen d'un autre train d'engrenages par un moteur asynchrone alimenté par le réseau. Ce moteur est calculé de telle sorte que son couple soit nettement supérieur à celui qu'exige la commande de la minuterie, et ceci pour que la machine synchrone joue bien le rôle de frein, non celui de moteur ; quant au couple maximum du ressort, il est choisi encore plus fort que celui du moteur asynchrone, de telle sorte que le remontage ne soit jamais complet.

b) En marche normale, le ressort et le régulateur ne jouent aucun rôle ; le mécanisme de la pendule se comporte donc comme un moteur synchrone auto-démarrreur dans lequel le couple de démarrage serait exagéré.

En cas de panne, ce sont au contraire le moteur et le frein qui ne fonctionnent plus, le ressort et le régulateur qui prennent leur place ; dès que le courant manque, en effet, le couple dû au ressort tendrait :

A faire tourner en sens inverse le moteur asynchrone — ce que l'on empêche au moyen d'un mécanisme à rochet et à cliquet ;

A faire tourner à une vitesse exagérée la minuterie — c'est alors qu'entre en jeu le régulateur de vitesse à force centrifuge calé sur le même arbre que le frein synchrone.

c) Ce régulateur (fig. 102) comprend en principe deux ressorts R solidaires de l'arbre O et portant au voisinage de leur extrémité libre des masses M, ainsi qu'une roue A à dents obliques mobile autour de son axe O' avec un certain frottement.

Pour la vitesse normale de l'arbre O, par exemple lorsque le frein magnétique fonctionne, la distance OO' des deux axes est telle que les ressorts ne touchent pas la roue A et que l'effet du régulateur est nul. Mais dès que la panne de courant supprime l'action régulatrice du frein, sous l'action motrice du ressort de barillet la vitesse de l'arbre O augmente, la force centrifuge qui agit sur les masses M écarte les ressorts et l'un d'eux vient bute

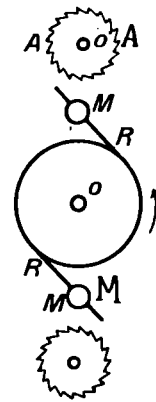


Fig. 102.

contre une dent de la roue A, lui communiquant une certaine énergie. La vitesse de l'arbre O diminue brusquement à la suite de ce choc, puis recommence à croître lentement jusqu'à un nou-

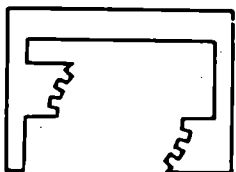
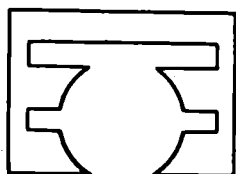


Fig. 103.

veau choc contre la roue A (qui a eu le temps de s'arrêter), et ainsi de suite, cette vitesse oscillant régulièrement entre deux valeurs extrêmes bien définies. En choisissant convenablement le moment d'inertie de la roue A et sa distance à l'arbre O on peut s'arranger pour que le mouvement discontinu de l'arbre O se fasse à une vitesse moyenne égale à celle qu'imposait le frein synchrone, et cela quel que soit le couple fourni par le ressort ; à mesure que celui-ci se détend, la fréquence des chocs diminue bien, mais la vitesse moyenne reste constante.

Le régulateur à force centrifuge n'ayant pas la précision d'un échappement de pendule, le système précédent n'est évidemment applicable que pour des pannes rares et de courte durée, mais dans ce cas il donne toute satisfaction. Sa construction n'est compliquée qu'en apparence : les deux rotors (frein et moteur) sont montés sur le même stator comportant une seule bobine et deux paquets de tôles superposés présentant le profil indiqué sur la figure 103.

d) A remarquer que le couple du moteur asynchrone doit être encore suffisamment puissant en marche normale, ce qui entraînerait dans d'autres cas (page 160) des difficultés d'accrochage ; cet inconvénient n'est pas à craindre ici, car s'il arrivait par hasard au rotor du frein de traverser sa vitesse normale sans s'accrocher, il serait brutalement ramené à une vitesse inférieure par le régulateur à force centrifuge.

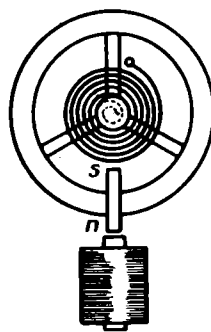


Fig. 104.

2° Dans la solution adoptée par Lepaute, on utilise une pendulette (à ressort moteur et à remontage automatique) sur le balancier de laquelle est placé un très léger barreau d'acier aimanté *ns* (fig. 104) ; en face de la position d'équilibre de celui-ci se trouve un petit électro-aimant alimenté par le secteur. En marche normale, les oscillations du balancier sont sous-synchronisées par les petites impulsions accélératrices ou retardatrices qu'il reçoit au voisinage de sa position d'équilibre ; en cas de panne de courant, l'horloge continue à fonctionner quoique avec une précision inférieure tant que la réserve de marche n'est pas épuisée.

Pratiquement on utilise un système spiral-balancier circulaire qui oscille à la fréquence 2,5, le barreau est en fer doux polarisé par un aimant extérieur (pour éviter sa désaimantation par le champ alternatif) ; enfin l'électro-aimant est excité par la même bobine que le moteur de remontage.

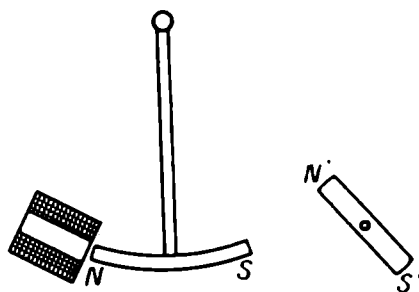


Fig. 105.

3° Comme énergie de réserve, au lieu d'un ressort de barillet on peut utiliser une pile. Dans le procédé Ato (fig. 105) le mouvement d'un balancier est dû normalement aux attractions et aux répulsions qui s'exercent entre son propre aimant NS et un aimant supplémentaire N'S' entraîné au moyen d'engrenages démultiplicateurs par un moteur synchrone autodémarrreur. En cas de manque de courant, dès que les amplitudes diminuent au-dessous d'une certaine limite, la pile entre automatiquement en action (au moyen d'un contact de Hipp par exemple (page 47) et la pendule continue sa marche par ses propres moyens.

Les dispositifs précédents permettent, sur les réseaux à fréquence contrôlée, d'obtenir avec les mouvements d'horlogerie les plus ordinaires une précision à peine inférieure à celle des horloges astronomiques.

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE

HORLOGES A GRAVITÉ

CHAPITRE PREMIER

Théorie du pendule.

INTRODUCTION	1
I. Pendule non amorti. Petites amplitudes	2
1. Calcul de la période	2
Cas particulier. Pendule simple	3
2. Réglage de la période	4
1 ^o Par variation de longueur	4
2 ^o Par déplacement d'une masselotte	5
II. Grandes amplitudes	7
3. Calcul de la période	7
4. Correcteurs d'isochronisme	10
1 ^o Ressort correcteur	10
2 ^o Butées élastiques	12
III. Amortissement et entretien	13
5. Causes d'amortissement	13
1 ^o Suspension	13
2 ^o Amortissement par l'air	14
3 ^o Courants de Foucault	15
4 ^o Manœuvre des aiguilles	17
6. Influence de l'amortissement sur la période	17
1 ^o Cas général	17
2 ^o Frottement indépendant de la vitesse	18
3 ^o Frottement proportionnel à la vitesse	18
4 ^o Amortissement par choc	19
7. Entretien des oscillations	21
IV. Mesure de la période	22
8. Méthode des passages	22
9. Méthode des coïncidences	24
1 ^o Principe	24

TABLE DES MATIÈRES

169

2° Observation optique	25
3° Battements naturels écoutés directement	25
4° Battements artificiels commandés par un contact élec- trique	26
5° Battements artificiels obtenus sans contact matériel ...	27
10. Détermination de la période par la mesure d'une variation de phase	29
V. Influence de la température	30
11. Balancier monométallique	30
12. Balancier bimétallique	31

CHAPITRE II

Horloges à balancier pendulaire.

I. Horloges à remontage	35
13. Principe	35
14. Force attractive d'un électro-aimant	36
1° Formule générale	36
2° Electro à fer à cheval	37
3° Electro blindé	38
4° Alimentation à tension constante	40
15. Remontage	40
16. Echappement	41
1° Comptage des oscillations	42
2° Entretien du mouvement	43
17. Précision	45
II. Horloges à entretien direct	46
18. Dispositif moteur	46
1° Electro-aimants	46
2° Aimant et bobine	48
19. Contact	48
1° Fonctionnement	48
2° Réalisation d'un bon contact	50
3° Contact de la pendulette Ato	50
4° Contact Bulle Clock	51
5° Contact pendule Ato	54
20. Couple moteur	55
21. Rendement électrique	63
22. Réalisation	66
1° Entretien par cellule photo-électrique	66
2° Entretien par condensateur	67
3° Solution Bulle clock	68
4° Solution Ato, etc.	69
5° Cas particuliers des pendulettes	69
6° Solution Brillié, etc.	70
23. Influence de la tension	71

DEUXIÈME PARTIE

HORLOGES A ÉLASTICITÉ

CHAPITRE III

Horloges à balancier circulaire.

I. Système balancier-spiral	73
24. Conditions d'isochronisme	73
25. Réglage.....	75
26. Echappement	76
27. Action de la température	78
1° Ordre de grandeur.....	78
2° Compensation	79
II. Moteurs de remontage.....	82
28. Difficultés de l'entretien direct.....	82
29. Electro-aimants	83
30. Moteurs asynchrones à stator monophasé	85
31. Moteurs à disques	86
1° Théorie	87
2° Réalisation	90
32. Moteurs à rotor cylindrique	91
1° Théorie	91
2° Réalisation	94

CHAPITRE IV

Horloges à diapasons et à quartz.

I. Diapasons	97
33. Entretien	97
34. Stabilité	101
35. Comparaison de deux diapasons. Courbes de Lissajoux	102
II. Quartz	104
36. Propriétés piezoélectriques	104
37. Entretien	106
38. Comparaison de deux quartz. Battements	106
III. Multiplication et démultiplication de fréquence	108
39. Par moteur synchrone et engrenages	108
40. Par utilisation d'harmoniques	110
41. Oscillations de relaxation	112
42. Démultiplication par oscillations de relaxation	118

TROISIÈME PARTIE

DISTRIBUTION DE L'HEURE

CHAPITRE V

Récepteurs ayant une période propre.

I. Horloges synchronisées	121
43. Etude mathématique de la synchronisation	121
1° Discussion	122
2° Application	123
44. Réalisation	124
1° Constance de la période excitatrice	124
2° Constance de la phase	125
3° Limitation de l'amplitude	125
45. Avantages et inconvénients	125
II. Horloges remises à l'heure	127
46. Principe	127
47. Commande par T. S. F.	129
III. Moteurs électriques synchronisés	132
48. Chronographes imprimants	133
49. Horloge parlante	140

CHAPITRE VI

Compteurs d'impulsions.

I. Distribution demi-minute	142
50. Fonctionnement et avantages	142
51. Récepteurs	143
52. Horloge mère	146
53. Remise à l'heure	148
II. Pendules synchrones	149
54. Stabilisation de la fréquence des réseaux électriques	149
55. Moteurs polarisés	151
1° Théorie	151
2° Démarrage	154
3° Réalisation	154
56. Moteurs non polarisés	154
1° Théorie	155
2° Réalisation	157
57. Moteurs auto-démarrateurs	158
1° Moteurs bipolaires	158
2° Moteurs multipolaires	159
58. Pendules à réserve de marche	164

Technique du réglage des appareils horaires. Système balancier spiral, par A. DONAT, chargé de cours à l'Ecole nationale d'horlogerie de Besançon. iv-200 pages 13 × 21, avec 62 figures. 1931. Cart. 39 fr. Br. 35 fr.

A. B. C. de l'apprenti horloger. Guide pratique conduisant l'apprenti depuis son entrée en apprentissage jusqu'à sa sortie, par M. BOURDAIS et G. GRALL, 232 p. 12 × 18, avec 200 fig. 5^e éd. 1932. Br. 15 fr.

Pour l'ajusteur-mécanicien. Origine, composition et propriété des matières premières. Recettes, formules, procédés, « trucs » et tours de main du praticien, par A. LEFÈVRE, constructeur-mécanicien, viii-186 pages 12 × 18, avec 181 figures, 3^e édition. 1934. Broché 16 fr.

Théorie et technologie des engrenages, par J. PERIGNON, ingénieur des Arts et Manufactures. Préface de P. BRICARD, professeur à l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures.

TOME I. — *Étude cinématique. Conventions usuelles. Étude dynamique*. xvi-278 pages 16 × 25, avec 188 figures, 1932. Rel. 81 fr. Br. 72 fr.

TOME II. — *Métallurgie. Forge. Fonderie. Taille. Rectification. Rodage. Problèmes annexes*. viii-299 pages 16 × 25, avec 257 figures, 1932. Rel. 81 fr. Br. 72 fr.

Mémento d'électrotechnique, par A. CURCHON, licencié ès sciences, ingénieur E. S. E., directeur technique de la *Revue générale de l'Electricité*, professeur à l'Ecole d'électricité et de mécanique industrielles, avec la collaboration de MM. BAYARD, BLOM, BRONSTEIN, COURTIN, JACOB, LABORDE, MERCY, PÉLISSIER, POCHOLLE, ROSEAU, VELLARD, ingénieurs. 4 volumes.

TOME I. — *Electricité et magnétisme ; Formules et tables. Lois fondamentales. Mesures. Constantes*. xvi-526 pages 13 × 21, avec 182 figures, 1932. Rel. 99 fr. Br. 90 fr.

TOME II. — *Machines et appareils électriques : machines électriques, tubes à vide et à gaz raréfiés, redresseurs statiques, appareillage électrique*. xviii-502 p. 13 × 21, avec 399 fig. 1932. Rel. 105 fr. Br. 96 fr.

TOME III. — *Réseaux de distribution d'énergie électrique. Transmission et distribution de l'énergie électrique. Production de l'énergie électrique d'origine thermique et d'origine hydraulique. Législation*. xviii-643 p. 13 × 21, 378 fig., 1933. Rel. 138 fr. Br. 128 fr.

TOME IV. — *Applications de l'électricité*. (Sous presse).

Mesures radio-électriques élémentaires, par P. DACOS, chargé de cours à l'Institut électrotechnique Montefiore et M. ROUSSEAU, docteur ès sciences, ingénieur assistant à l'Université de Liège. Préface de O. DE BAST, directeur de l'Institut électrotechnique Montefiore. 233 p. 12 × 19, avec 83 figures. 1933. Broché 25 fr.

Travaux pratiques d'électricité industrielle, par P. ROBERJOT, professeur à l'école pratique d'industrie de Reims. Préface de L. BARBILLION, directeur de l'Institut électrotechnique de Grenoble, 4 volumes.

TOME I. — *Mesures industrielles*. x-304 p. 13 × 21, avec 304 fig., 3^e éd., 1932. Rel. 23 fr. Cart. 20 fr. Br. 18 fr.

TOME II. — *Étude des machines électriques. Propriétés. Essais*. viii-317 p. 13 × 21, avec 236 figures. 3^e édition. Nouveau tirage 1933. Rel. 23 fr. Cart. 20 fr. Br. 18 fr.

TOME III. — *Installations intérieures*. 364 pages 13 × 21, avec 496 figures. 3^e édition. 1929. Rel. 24 fr. Cart. 21 fr. Br. 19 fr.

TOME IV. — *Usines génératrices. Transformateurs. Canalisations*, avec la collaboration de M. FÉRU, ingénieur à la Cie électromécanique. iv-234 pages 13 × 21 avec 194 figures et 7 planches. 3^e édition. 1931. Rel. 24 fr. Cart. 21 fr. Br. 19 fr.

Les aimants. Leur calcul et la technique de leurs applications, par R.-V. PICOU, ingénieur des Arts et Manufactures, lauréat de l'Institut. viii-110 p. 16 × 25, avec 76 fig. 1927. Rel. 31 fr. Br. 22 fr.

Les machines asynchrones à champs tournants, à bagues et à collecteur. Théorie générale et applications, par R. LANGLOIS, ingénieur en chef du service technique aux Ateliers de constructions électriques de Jeumont. Préface de D. BERTHELOT, de l'Académie des Sciences. xvi-268 pages 16 × 25, avec 120 figures. 1926. Rel. 61 fr. 50. Br. 53 fr. 50

Agenda Dunod : Electricité. Aide-mémoire pratique de l'électricien, par L.-D. FOURCAULT, ing.-conseil. xxxii-474 p. 10 × 15, avec 126 fig. 54^e édition. 1935. Relié pégamoïd 20 fr.

Agenda Dunod : Construction mécanique, par J. IZART, ingénieur-conseil. xxiv-485 pages, 10 × 15, avec 151 figures, 54^e édition, 1935. Relié pégamoïd ... 20 fr.