

Les Horloges de commutation à mouvements mécaniques remontés électriquement.

(suite).

par Marius LAVET

Ingénieur A. M. et E. S. E.

de la Société Anonyme des Établissements Léon HATOT.

Résumé. — L'auteur a étudié précédemment les dispositifs de remontage des horloges de commutation au moyen d'organes moteurs électriques à mouvement alternatif¹. Le présent exposé est consacré aux questions suivantes :

Remontage des ressorts au moyen des principaux types de moteurs électriques à mouvement rotatif d'un seul sens (moteurs tournant par saccades, moteurs magnéto-électriques, moteurs d'induction, moteurs à hystérésis, moteurs universels à collecteurs, moteurs synchrones polarisés à auto-démarrage);

Dispositifs de freinage et d'arrêt (par débrayages mécaniques et par interrupteurs) permettant de limiter le remontage des ressorts;

Principes des systèmes de remontage des poids par moteurs électriques industriels;

Remontage des ressorts par moteurs thermiques à chauffage électrique;

Influence des organes de remontage sur la marche des horloges comportant des ressorts importants à spires frottantes;

Examen comparatif des principaux systèmes de remontage.

Les particularités de réalisation des remontoirs influent plus ou moins favorablement sur la précision des horloges actionnées par un important ressort servant de réserve d'énergie. Les meilleurs résultats sont obtenus lorsque le remontoir agit périodiquement et rapidement, ce qui exige un moteur électrique relativement puissant et un dispositif d'arrêt ou de débrayage établi pour utiliser seulement une petite partie faiblement inclinée de la courbe de détente du bâillet.

Il semble possible de perfectionner les commutateurs horaires usuels, employés dans les installations de distribution d'énergie à courants alternatifs, en opérant les remontages et les manœuvres d'interrupteurs au moyen de moteurs synchrones capables de maintenir l'exactitude des mouvements d'horlogerie.

1. Voir les « *Annales françaises de chronométrie* », n°s 3-4, 1944, pp. 117 à 174 et n° 2, 1947, pp. 117 à 138.

IV. — Étude des moteurs à mouvement rotatif d'un seul sens appliqués au remontage des horloges et aux commandes horaires.

Sous-classification.

Dans les horloges de commutation on utilise de nombreux types de moteurs tournant d'un mouvement continu ou discontinu dans un seul sens. Nous examinerons successivement les applications aux remontoirs des principaux systèmes suivants :

- a) dispositifs moteurs-récepteurs comportant un rotor en fer doux ou en acier aimanté tournant par saccades sous l'influence d'une émission périodique de courant d'un seul sens ou de sens alterné;
- b) moteurs magnéto-électriques munis de collecteurs (moteurs à anneau Gramme, moteurs O'K à induits sans fer, moteurs à induits cylindriques sans pôles saillants, etc.);
- c) petits moteurs asynchrones à induction et à hystérésis (moteurs type Ferraris à disques ou à tambours conducteurs, moteurs à disques ou tambours en acier, moteurs à cages d'écu-reuil, etc.);
- d) moteurs divers à collecteurs, moteurs industriels ordinaires;
- e) moteurs synchrones à auto-démarrage bipolaires et multipolaires.

Nous insisterons seulement sur les propriétés des systèmes qui n'ont pas fait l'objet de publications récentes dans les revues horlogères.

A. — MOTEURS-RÉCEPTEURS TOURNANT PAR SACCADES.

Nous décrirons à titre d'exemple le moteur-récepteur à impulsions *Bohmeyer* qui tourne par saccades de 90 degrés². Comme l'indique schématiquement la figure 66, la partie fixe de ce moteur comporte 4 bobines B_1 , B_2 , B_3 et B_4 alimentées au moyen d'une source à courant continu par l'intermédiaire d'un commutateur à deux directions. Les bobines sont reliées de telle façon que deux d'entre elles seulement, celles qui sont en diagonale, soient actives en même temps. La partie motrice est un armature en fer doux AF ayant la forme d'un double segment. L'ensemble se comporte comme deux électro-aimants dont l'armature commune accomplit un quart

2. Voir « *L'Electricité et ses applications à la Chronométrie* », par A. Favarger, p. 200.

de tour chaque fois que l'un des deux groupes de bobines est traversé par une émission de courant. Les progressions dans un seul sens sont assurées par un cliquet qui s'oppose au recul de l'arma-

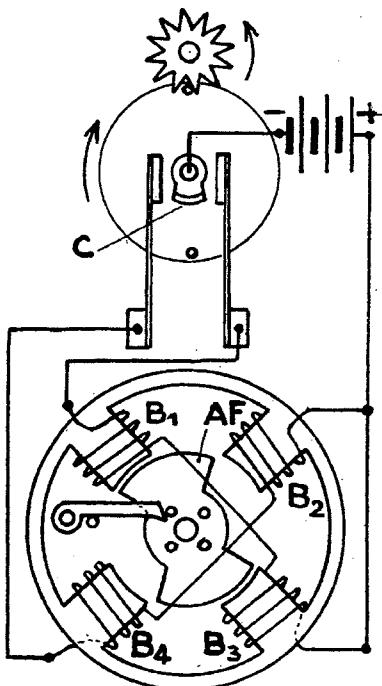


Fig. 66

FIG. 66. — Remontoir *Bohmeyer*. *AF* armature en fer progressant par saccades de $1/4$ de tour lorsque le commutateur *C* tourne rapidement de $1/2$ tour, sous l'influence d'un ressort auxiliaire dont les détentes sont déclenchées par le mécanisme horaire.

ture et la maintient dans des positions convenables après chaque action motrice.

Le mouvement rotatif ainsi obtenu est transmis à deux ressorts de bâillet; le premier ressort a pour fonction d'entretenir la marche de l'horloge régularisée par un échappement et un pendule ordinaires; le deuxième ressort commande les rotations par demi-tours du commutateur *C*. Ces rotations sont déclenchées périodiquement au moyen du mouvement d'horlogerie et se font assez rapidement (dispositif *Paul Garnier* analogue à celui que nous avons représenté sur les fig. 36a, 36c³).

A la place de l'armature en fer doux, on peut employer une armature polarisée tournante analogue à celle de certaines horloges réceptrices commandées à distances par horloges-mères. Dans ce cas, le commutateur C est remplacé par un inverseur de courant⁴. La maison *Siemens et Halske* a établi sur ce principe des horloges-mères convenant à la distribution de l'heure sur les navires par émissions de courant alternativement renversées. Dans ces appareils, le mouvement du rouage est régularisé par un balancier circulaire associé à un spiral. La commande de l'inverseur par un bâillet à ressort auxiliaire permet d'obtenir des contacts très appuyés sans troubler par trop la régularité du mécanisme horaire auquel on demande seulement des efforts minimes de déclenchement.

B. -- MOTEURS MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES.

L'idée de se servir de moteurs électriques à rotation continue pour remonter les poids et les ressorts des horloges est très ancienne. Les moteurs tournant rapidement se prêtent à de nombreuses combinaisons car ils permettent de développer un travail important en mettant seulement en jeu, pendant le temps convenable, une puissance électrique relativemnt faible.

Les premières recherches ont porté sur la réalisation de petits moteurs de consommation modérée pouvant fonctionner avec des piles. Les inventeurs se sont efforcés d'établir des moteurs peu encombrants capables de démarrer avec une grande facilité.

L'un des premiers moteurs ayant donné des résultats encourageants comportait un inducteur formé par un aimant permanent fixe et un induit lisse à anneau Gramme⁵. Ce type de moteur présente l'avantage d'avoir un induit magnétique mobile de forme circulaire concentrique à l'axe de rotation et disposé à une assez grande distance des pôles de l'aimant. Dans ces conditions le rotor n'est pas retenu dans certaines positions angulaires de réluctance minimum et la mise en marche du moteur peut être assurée au moyen d'un couple relativement très faible, à la seule condition d'atténuer convenablement les frottements sur le collecteur. Ce résultat n'est pas obtenu avec la construction habituelle des moteurs

3. Voir « *Annales françaises de chronométrie* », n° 2, 1947, p. 125.

4. Nous avons étudié ces systèmes au cours d'une communication présentée à la réunion du 8-11-1947 de la Société chronométrique de France. (Voir « *Annales françaises de chronométrie* », n° 3, 1948, pp. 229 à 240.)

5. Horloge à sonnerie Japy Frères et C^e, système Napoli, décrite dans « *La Lumière Electrique* », 1881, p. 387.

comportant des enroulements logés soit dans de larges rainures, soit autour de pôles saillants très rapprochés de l'inducteur. Cependant les petits moteurs à induits Gramme fonctionnent avec un faible rendement et présentent divers inconvénients pratiques, aussi leurs applications ne se sont pas développées.

En 1897, un moteur magnéto-électrique beaucoup plus avantageux a été réalisé par C. Ed. O'Keenan, l'inventeur des compteurs ampèremétriques bien connus sous la marque O'K⁶. Ce système a permis de réaliser plusieurs modèles d'horloges à remontages électriques présentant des qualités remarquables.

Le moteur O'K est caractérisé par un induit rotatif léger *qui ne comporte aucune pièce en fer*; l'enroulement conducteur relié à un petit collecteur à trois lames est mobile dans un champ magnétique très intense. Toutes les précautions utiles ont été prises pour éviter les pertes d'énergie par les résistances passives : frottements, hystérésis, courants de Foucault, effet Joule.

La figure 67 indique le mode de construction habituel du moteur O'K. L'induit *Cy*, en forme de cloche mince, est obtenu en enroulant séparément sur des mandrins six bobines rectangulaires de faible épaisseur; celles-ci sont ensuite appliquées et collées sur un cylindre de toile rendu rigide par un enduit isolant approprié. Le champ magnétique excitateur est dû à un très fort aimant permanent A, muni d'un noyau F en fer doux. En somme, l'équipage mobile est équivalent à trois cadres disposés à 120° dont les conducteurs actifs se déplacent dans un entrefer annulaire comme ceux des galvanomètres Deprez et d'Arsonval. Les sections de l'enroulement sont reliées à un collecteur simplifié de très faible diamètre sur lequel frottent légèrement deux balais *bl*₁ et *bl*₂ (force de 0,5 à 1 gramme). Les contacts se font argent sur argent ou or sur or.

Le moteur fonctionne au moyen de courants très faibles (2 milliampères). La tension continue entre les balais est généralement inférieure à 3 volts.

Pour mettre en évidence les propriétés de ce système on peut l'assimiler à un moteur classique à excitation séparée constante

6. Le moteur O'K (brevet n° 271.788 du 30 octobre 1897) a été décrit dans le Bulletin de novembre 1899 de la *Société Internationale des Electriciens*. Il est étudié en détail dans le Bulletin, 3^e trimestre 1930, de l'*Association amicale des anciens élèves de Cluses*. Les compteurs O'K, construits par la Compagnie pour la Fabrication des Compteurs et Matériels d'Usines à Gaz, sont très répandus en France et à l'étranger.

muni d'un induit enroulé en tambour et d'un collecteur très divisé.

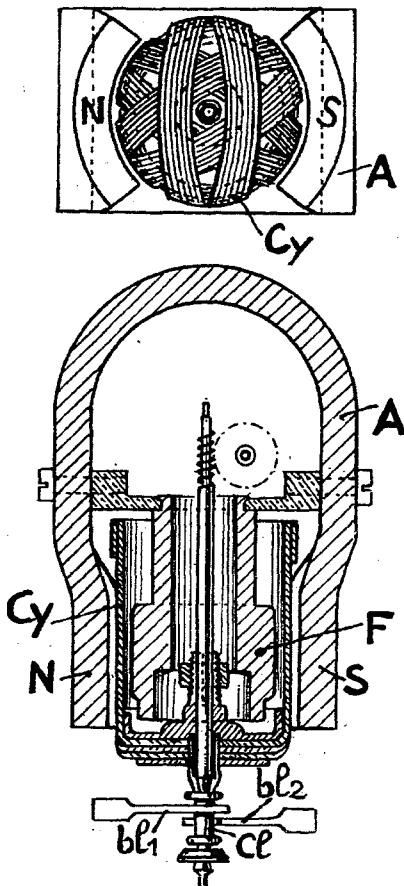


Fig. 67

FIG. 67.— Moteur O'Keenan. *Cy* induit en fil de cuivre, sans fer, tournant dans le champ magnétique intense développé par l'aimant *A*.

Désignons par *U* la tension d'alimentation en volts, par *N* le nombre des conducteurs périphériques de l'induit, par Φ le flux inducteur (en maxwells), par *n* le nombre de révolutions par seconde en marche de régime à vitesse constante.

La force contre-électromotrice engendrée, exprimée en volts, sera de :

$$E = Nn\Phi \cdot 10^{-8}$$

Le courant *I*, en ampères, traversant l'induit de résistance *R* sera tel que : $U - E = RI$.

— 51 —

Si C représente le couple moteur (en dynes-centimètres), le travail par seconde, ou puissance du système en rotation, sera de :

$$(1) \quad P = 2\pi n C = EI \cdot 10^7 = \frac{E(U-E)}{R} \cdot 10^7$$

$$(2) \quad \text{d'où} \quad C = \frac{10^{-1}}{2\pi} IN\Phi$$

Dans les compteurs O'K, on réduit à l'extrême le couple résistant de façon que le moteur tourne à vide avec des pertes mécaniques et électriques minimes. Par suite, le moteur prend la vitesse limite pour laquelle la force contre-électromotrice E atteint sensiblement la valeur de la tension U appliquée aux balais. On a donc, approximativement :

$$\begin{aligned} E &= U = Nn \Phi \cdot 10^{-8} \\ \text{d'où} \quad n &= 10^8 \frac{U}{N\Phi} \end{aligned}$$

On voit que, dans ces conditions, la vitesse angulaire de l'induit est proportionnelle à la tension U et inversement proportionnelle au flux Φ dû à l'aimant. Elle est indépendante de la résistance R de l'enroulement et, par suite, des variations de R avec la température ambiante.

Remarquons que le moteur absorbe en une seconde une énergie électrique UI et produit un travail EI ; il fonctionne donc avec un rendement :

$$\rho = \frac{E}{U}$$

Ce rendement devient très voisin de la valeur idéale 1 lorsque l'induit ne fournit aucun travail extérieur appréciable. Dans ce cas la tension $(U - E)$ existant entre les balais et les lames de collecteur devient très faible, ainsi que l'intensité car :

$$I = \frac{U-E}{R}$$

Le moteur des compteurs O'K est d'une réalisation si satisfaisante que le rendement E/U atteint couramment 99 pour cent. Grâce à la réduction du courant et de la tension entre les balais et les lames du collecteur, les étincelles sont évitées et les contacts électriques se maintiennent en bon état pendant plusieurs années de fonctionnement continu. L'amélioration de la commuta-

tion provient aussi du fait que l'induction propre des circuits coupés (sans noyaux en fer) est très faible.

Plusieurs inventeurs se sont proposé de tirer parti des avantages des moteurs magnéto-électriques à induits sans fer pour perfectionner les horloges électriques. En particulier O'Keenan a déposé plusieurs brevets portant sur l'application de son moteur au remontage des horloges-mères et à la distribution de l'heure; toutefois ces systèmes n'ont pas donné de parfaits résultats et ont été abandonnés. En revanche Ch. Poncet a construit à l'Ecole de Cluses de nombreux régulateurs remontés par moteurs O'K, d'un fonctionnement entièrement satisfaisant.

Nous nous limiterons à un très bref exposé de ces travaux.

Remarquons, tout d'abord, qu'un compteur O'K de rendement très voisin de 1, excité par un flux constant et relié à une tension continue constante, prend une vitesse à peu près invariable et se comporte ainsi comme une horloge qui peut être munie d'une aiguille trotteuse tournant d'un mouvement rapide et continu. Toutefois, l'expérience montre que ce système ne permet pas d'atteindre une précision suffisante pour les applications horlogères courantes.

O'Keenan a proposé d'améliorer la régularité de marche en reliant l'arbre du moteur à un échappement usuel d'horloge par une liaison élastique⁷. Ce dispositif permet d'imposer à l'induit une vitesse moyenne de régime en rapport constant avec la fréquence d'un oscillateur mécanique servant de régulateur (pendule ou balancier circulaire). Du côté opposé au collecteur, on peut capter, en des points convenables de l'induit, des tensions alternatives monophasées ou polyphasées permettant d'actionner des horloges réceptrices à moteurs synchrones.

Avec un accouplement élastique, la roue d'échappement reçoit un couple qui peut varier selon la tension de la source d'électricité. Dans le but d'éviter cette cause d'irrégularité, O'Keenan a proposé d'entraîner la roue d'échappement par l'intermédiaire d'un accouplement à friction⁸ patinant fréquemment. Ce mode de liaison

7. Brevet n° 449.875 du 25 octobre 1912, intitulé « système d'horloges électriques synchrones » (voir aussi les additions n° 17.356 et n° 18.291).

8. Brevet n° 411.673 du 18 janvier 1910 intitulé « système d'entraînement ou de freinage par frottement pour horloge et autres appareils ».

Dans le brevet n° 444.818 du 10 juin 1912, O'Keenan a décrit un système d'horloge remontée par un moteur O'K caractérisée par des transmissions permettant de commander la minuterie et de remonter un ressort de barillet actionnant une sonnerie.

serait parfait si l'on pouvait obtenir un coefficient de frottement sensiblement constant, indépendant de la vitesse du moteur (conformément à la loi de Coulomb). Malheureusement l'expérience a montré que le frottement de glissement des corps solides employés subissait à la longue des variations inadmissibles.

De meilleurs résultats ont été obtenus en utilisant le système O'K comme simple moteur de remontage à fonctionnement intermittent, charger d'actionner en temps utile un ou plusieurs arbres de barillet au moyen d'engrenages démultiplieurs. Pour cette application, on intercale dans le circuit du moteur un interrupteur automatique qui coupe le courant dès que les ressorts sont suffisamment tendus. Pour simplifier le mécanisme, on s'efforce généralement d'augmenter la puissance utile du moteur en admettant un rendement de l'ordre de 50 pour cent et, par suite, une force contre-électromotrice de régime :

$$E_r = \frac{U}{2}$$

Cette valeur correspond au maximum de l'expression trouvée précédemment :

$$P = \frac{E(U-E)}{R} 10^7$$

Le moteur considéré est très sûr car il fonctionne avec un couple de démarrage élevé. En effet, ce couple a pour valeur :

$$C_d = \frac{10^{-1}}{2\pi R} N \Phi U$$

Le couple moteur décroît au fur et à mesure de l'augmentation de la vitesse et de la force contre-électromotrice. Les courbes figure 68 indiquent les variations de la puissance mécanique et du couple en fonction de la vitesse angulaire de l'induit.

Les données numériques suivantes montrent l'intérêt des moteurs magnéto-électriques bien construits pour la réalisation de remontoirs électriques capables de fonctionner avec des piles de petit volume : un moteur O'K, établi pour développer une puissance relativement élevée au moyen d'un seul élément de pile (tension moyenne 1,2 volt), est capable de produire en une seconde un travail d'environ 125 grammes-centimètre; il consomme pour cela un courant moyen d'environ 20 milliampères. Le temps nécessaire pour remonter un fort ressort de barillet emmagasinant 1 Kgm (treuil d'un rendement de l'ordre de 50 %), est d'environ 30 minu-

tes. La consommation d'énergie électrique correspondante est de 0,012 Wh, c'est-à-dire moins du millième de l'énergie que peut débiter une pile usuelle de $4 \times 4 \times 10$ cm. Les régulateurs distributeurs Ch. Poncet munis de pendules et d'échappements Graham

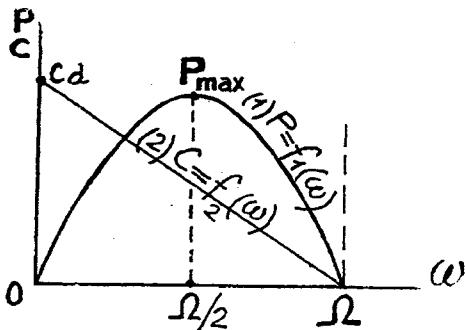


Fig. 68

FIG. 68. — Courbes caractéristiques d'un moteur magnéto-électrique O'K.
Courbe (1) : puissance utile en fonction de la vitesse. Courbe (2) : couple en fonction de la vitesse.

dont la construction est très soignée, dépensent moins de 1,5 watt-heure par an.

Dans son important ouvrage « *L'Horloger* », tome II^e, Ch. Poncet a décrit en détail divers dispositifs très ingénieux de remontoirs par moteurs O'K pouvant être alimentés soit par piles, soit par le secteur alternatif. Dans ce dernier cas, il suffit d'interposer un transformateur et un petit redresseur à oxyde de cuivre ou au sélénium. Les horloges ainsi réalisées possèdent une réserve de marche plus ou moins importante suivant le choix des ressorts-moteurs et des treuils de remontage.

De nombreux inventeurs ont cherché à s'impliquer la construction des moteurs magnéto-électriques⁹. On a utilisé notamment des moteurs à induits genre navette Siemens, mais munis de 3 pôles saillants à 120° (fig. 69). On rencontre alors une difficulté tenant

9. *L'Horloger* (tome II), par Ch. Poncet, Directeur de l'Ecole Nationale d'Horlogerie de Cluses, pp. 95 à 108. (Librairie de l'Enseignement Technique, 61, boulevard Saint-Germain, Paris, v^e). L'auteur recommande le moteur O'K pour les remontages effectués au moyen de piles, mais signale que ce moteur a l'inconvénient de coûter cher et d'exiger un réglage très précis des balais.

10. Signalons qu'un moteur O'K de petite dimension a été utilisé avec succès, dans l'horloge exploitée par l'ancienne Société *Electric-Silentia* à Besançon, horloge décrite dans l'ouvrage *L'Horloger Électricien* (1926) par Albert Berner, Magnon, éditeur, Suisse). Divers moteurs électriques de petite dimension sont décrits dans l'ouvrage suivant : *Les petites machines électriques* par Henri Lanoy, tome III, Librairie Girardot et C^e, 27, quai des Grands-Augustins, Paris (v^e).

à ce que les pôles de l'inducteur exercent sur ceux de l'induit de fortes attractions irrégulières qui peuvent empêcher le démarriages au moyen d'un courant faible. Pour éviter cet effet, on augmente l'étendue des épanouissements polaires. On a proposé aussi¹¹ d'entourer l'induit d'un tube mince en fer très doux qui rend la réluctance du circuit magnétique à peu près constante quelle que

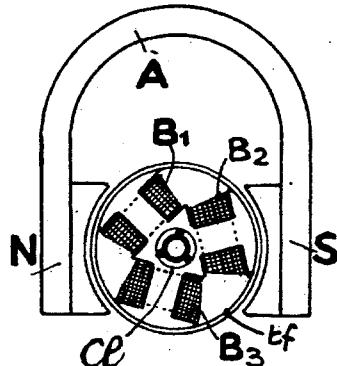


Fig. 69

FIG. 69.— Moteur magnéto-électrique à 3 bobines. *tf* tube mince en fer destiné à atténuer les variations de réluctance provenant des pôles saillants.

soit la position angulaire du rotor; le couple nécessaire pour le démarrage peut ainsi être réduit sensiblement mais les pertes par fuites magnétiques sont augmentées ce qui réduit la puissance motrice de régime.

Signalons aussi que l'on pourrait donner aux induits bobinés, sans fer, la forme de disques plats et minces, comme dans l'ancienne dynamo, système Desroziers¹². Les progrès accomplis dans la fabrication des aimants permettraient actuellement d'établir des moteurs genre O'K de faible encombrement en adoptant la disposition représentée sur la figure 70; il serait même possible d'utiliser un enroulement fixe agissant sur des aimants circulaires mobiles, ce qui conduirait à la construction de moteurs particulièrement robustes¹³.

11. Brevet n° 622.385 (1926), Gosselin et Société Ch. Mildé et Cie.

12. La dynamo Desroziers a été décrite dans *L'Electricien* du 9 mai 1891. Des induits en disques à 3 bobines noyées dans un isolant moulé à chaud sont utilisées dans les compteurs ampèremétriques construits par diverses maisons (Compagnie Continentale pour la fabrication des Compteurs, Landis et Gyr, Sangamo, A. E. G., etc.).

13. Demande de brevet en cours.

C. — PETITS MOTEURS ASYNCHRONES A INDUCTION ET A HYSTÉRÉSIS.

Les petits moteurs sans collecteurs alimentés au moyen du courant alternatif monophasé habituellement fourni par les secteurs

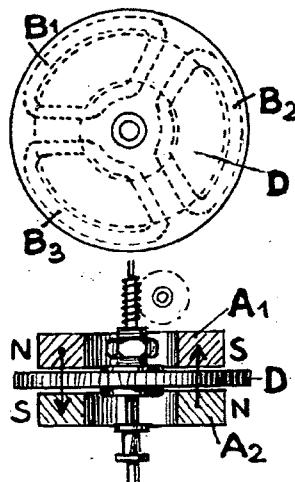


Fig. 70

FIG. 70.— Moteur magnéto-électrique simplifié comportant un induit à disque *D*, sans fer, mobile entre deux aimants bipolaires en forme de bagues *A₁* et *A₂*.

de distribution d'énergie sont souvent employés dans les remontoirs des horloges de commutation. En particulier, on utilise très fréquemment des moteurs à champs tournants ou glissants dont la partie mobile est formée simplement par un tambour ou par un disque en métal bon conducteur ou en métal magnétique présentant une forte hystérésis. Parfois le rotor renferme plusieurs métaux de qualités différentes. Avant d'aborder l'examen des particularités de construction de ces systèmes, nous allons étudier deux phénomènes fondamentaux qui interviennent dans un grand nombre de moteurs asynchrones et synchrones :

1° l'entraînement d'un tambour conducteur non magnétique, par un champ tournant, (principe des accouplements et des moteurs à courant de Foucault, type Ferraris) ;

2° l'entraînement d'un cylindre feuilleté en matière ferromagnétique (principe des accouplements et des moteurs à hystérésis, type Warren).

1° *Principe des accouplements à courant de Foucault.*

Considérons, par exemple, le dispositif représenté sur la fig. 71a constitué par un aimant rotatif bipolaire NS entraînant un cylindre M en cuivre ou en aluminium, monté sur un axe normal aux lignes de force.

La théorie des moteurs à courants de Foucault présente de très grandes difficultés provenant du fait que les circuits électriques

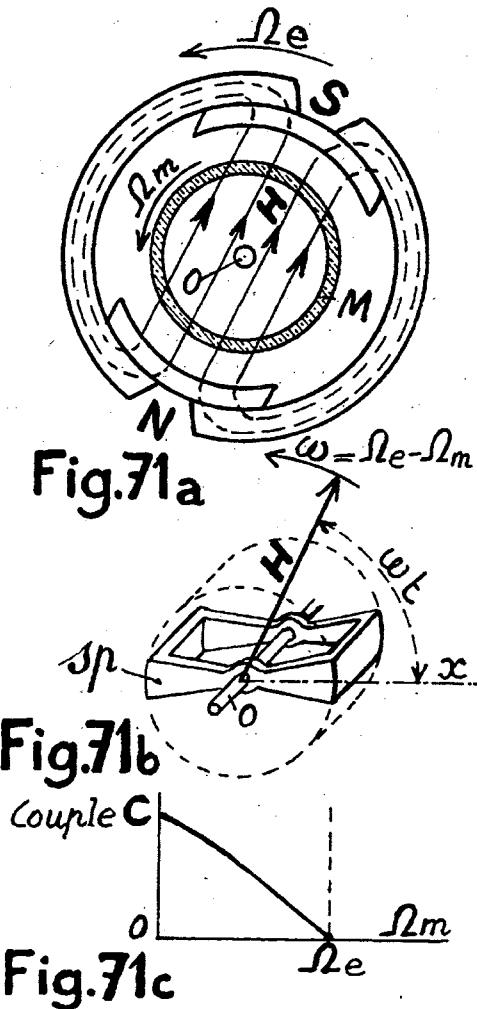


FIG. 71 a, 71 b, 71 c. — Entraînement d'un cylindre conducteur M par un aimant rotatif NS. La fig. 71 c (courbe du couple d'entraînement en fonction de la vitesse) montre que le couple est nul lorsque M tourne sans glissement ($\Omega_m - \Omega_e = 0$). La proportion de puissance perdue par effet Joule dans le rotor est égale au glissement relatif ω/Ω_m .

— 58 —

dans les pièces conductrices massives sont mal définis. Pour simplifier notre étude, nous assimilerons la masse cylindrique M à plusieurs spires fermées, telles que la spire sp représentée sur la figure 71b. Nous supposons que M est constitué par n spires sp identiques, isolées les unes des autres et formant des angles égaux. Nous admettrons que le champ magnétique H développé par l'aimant est uniforme dans la région occupée par les spires et que ce champ inducteur n'est pas sensiblement modifié par la réaction du faible champ antagoniste provenant des courants induits dans les spires entraînées.

Calculons le couple s'exerçant sur la spire sp lorsque la vitesse angulaire *relative* du champ H par rapport au cylindre récepteur est de ω . En désignant par Ω_e la vitesse angulaire de l'aimant entraîneur et par Ω_m la vitesse de M , on a

$$\omega = \Omega_e - \Omega_m$$

On peut admettre que le couple cherché est le même que celui qui tend à entraîner la spire sp lorsque celle-ci est immobilisée tandis que le champ H tourne à la vitesse ω .

En désignant par S la surface de la spire sp , on voit que cette spire est traversée par un flux alternatif

$$\Phi = SH \sin \omega t$$

La force électromotrice induite dans la spire est, en valeur absolue

$$|e| = \frac{d\Phi}{dt} = SH \omega \cos \omega t$$

Soient R la résistance et L le coefficient d'induction propre (self-induction) de la spire fermée considérée.

L'intensité qui la traverse est

$$i = \frac{SH \omega}{Z} \cos(\omega t - \varphi)$$

avec

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2} \text{ (impédance)}$$

et

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L \omega}{R}$$

L'énergie instantanée qui apparaît dans le temps dt et se transforme en chaleur a pour valeur

$$dW = eidt = \frac{S^2 H^2 \omega^2}{Z} \cos \omega [\cos(\omega t - \varphi)] dt$$

— 59 —

On a donc pour valeur de la puissance dissipée

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{S^2 H^2 \omega^2}{2Z} [\cos \varphi + \cos(2\omega t - \varphi)]$$

Négligeons la puissance fluctuante proportionnelle à $\cos(2\omega t - \varphi)$ car elle n'intervient pas dans l'entraînement d'un solide de révolution formé par de nombreuses spires décalées d'angles égaux. La puissance moyenne dissipée dans la spire sp est de

$$P = \frac{S^2 H^2 \omega^2}{2Z} \cos \varphi$$

La spire sp , par suite, se comporte comme un frein exerçant sur l'aimant A un couple moyen C et absorbant une puissance

$$P = C \omega.$$

En vertu du principe de l'égalité de l'action et de la réaction, le couple C est aussi le couple exercé par l'aimant qui entraîne la spire S. On a

$$C = \frac{P}{\omega} = \frac{S^2 H^2 \cos \varphi}{2Z} \times \omega$$

Lorsque $L\omega$ est très faible devant R (spire conductrice sans noyau de fer doux, donc peu inductive), $\cos \varphi$ est voisin de 1 et l'impédance Z est approximativement égale à R. Avec ces simplifications et en considérant la masse totale du cylindre entraîné comme équivalente à n spires sp , on obtient pour valeur du couple d'entraînement total

$$nC = n \frac{S^2 H^2}{2R} \times \omega$$

Nous retiendrons surtout de cette étude sommaire que le couple développé par un aimant rotatif sur un cylindre conducteur récepteur peu inductif est proportionnel à la vitesse angulaire de l'aimant par rapport au cylindre récepteur, à la conductibilité du métal dont le cylindre est constitué ainsi qu'au *carré du flux magnétique* qui traverse le cylindre.

La mesure du couple d'entraînement pourrait être obtenue en faisant tourner l'aimant NS à la vitesse ω et en arrêtant le cylindre au moyen d'un ressort dynamométrique. La déviation d'une aiguille solidaire du cylindre A pourrait permettre aussi la mesure

de la vitesse angulaire ω^{14} . Cette déviation est à peu près proportionnelle à ω ; toutefois, lorsque la vitesse est très grande, il se produit un affaiblissement de H en raison de la réaction du courant induit qui tend à affaiblir l'aimant A et à détourner les lignes de force à l'extérieur du cylindre conducteur M.

Le système figure 71a peut être employé pour former un embrayage permettant d'actionner un organe récepteur tournant à vitesse variable. Si le cylindre M était parfaitement libre, il tournerait à une vitesse égale à celle de l'aimant NS; mais s'il y a transmission de puissance, il y a forcément un glissement

$$\omega = \Omega_e - \Omega_m.$$

Le glissement entraîne la production de courant de Foucault et la dissipation d'une certaine puissance par effet Joule. Pour actionner le récepteur M il faut donc dépenser, en plus de la puissance utile, la puissance perdue par le dégagement de chaleur. Cette perte est d'autant plus grande que le glissement ω est plus important; par suite le rendement de la transmission s'abaisse lorsque le couple résistant augmente.

2° Principe des accouplements à hystérésis magnétique.

On obtient un accouplement à hystérésis en remplaçant dans le dispositif figure 71a, le tambour conducteur M par une masse cylindrique feuilletée M' en acier trempé n'ayant pas subi d'aimantation préalable. Ce système, représenté sur la figure 72a, permet d'analyser le fonctionnement de divers appareils actuellement très employés en horlogerie électrique, notamment les moteurs synchrones Warren comportant des rotors en forme de solides de révolution homogènes non préaimantés dans certaines directions.

Dans le cas de la figure 72a, l'entraînement de M' n'est pas dû aux courants de Foucault, ceux-ci étant évités par la subdivision de l'acier. Lorsque l'aimant A tourne à la vitesse Ω_e plus grande que la vitesse Ω_m du cylindre récepteur, il se produit une perte d'énergie qui provient du phénomène bien connu de l'hystérésis tournante. Pendant une rotation relative sur un angle 2π du vecteur représentant le champ inducteur H dû à l'aimant NS,

14. Sur ce principe sont basés les indicateurs de vitesse système Marcel Deprez (n° du 11 juin 1881 dans la *Lumière Electrique*, t. III, p. 407) actuellement très employés sur les automobiles et sur les avions. Nous avons étudié les perfectionnements récents de ces appareils dans le n° de décembre 1947 de la Revue *Microtecnica*, pp. 275 à 280.

l'état magnétique de chaque volume élémentaire composant le cylindre M' est modifié comme le montre le cycle d'hystérésis

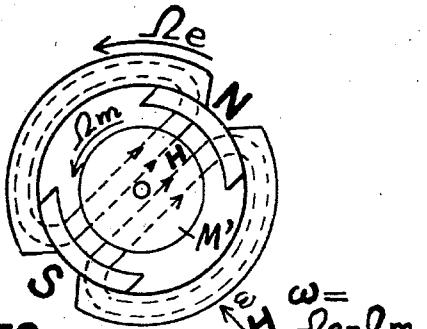


Fig. 72a

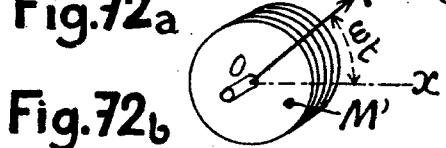


Fig. 72b

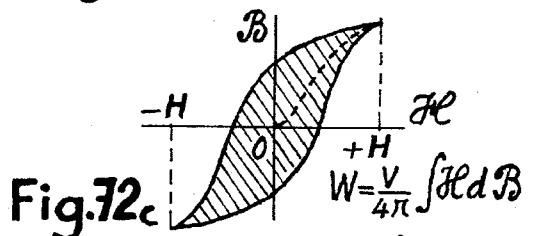


Fig. 72c

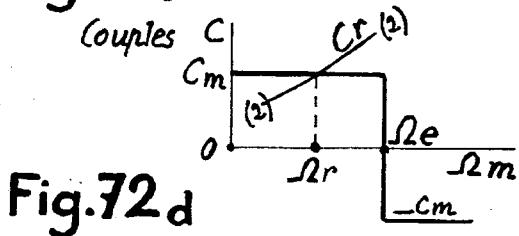


Fig. 72d

FIG. 72 a, 72 b.— Principe des accouplements à hystérésis magnétique (M cylindre en acier trempé feuilleté entraîné par l'aimant tournant NS ; ω vitesse relative).

FIG. 72 c. — Cycle d'hystérésis dont la surface est proportionnelle à la perte d'énergie pour une rotation relative de 1 tour de M' par rapport à NS .

FIG. 72 d. — Diagramme représentant le couple moteur en fonction de la vitesse de l'aimant entraîneur NS . Le couple moteur constant C_m changerait de signe si l'on faisait tourner M' à une vitesse supérieure à la vitesse de Ω_e de NS . Le cylindre M' tourne sans glissement lorsque le couple résistant est inférieur à C_m ; toutefois, un glissement peut se produire dans le cas d'un couple résistant progressant comme l'indique la courbe (2).

(fig. 72c). On voit que la direction de l'aimantation est renversée. Une certaine énergie proportionnelle au volume d'acier considéré

— 62 —

et à l'aire du cycle (surface hachurée, *fig. 72c*), est dissipée sous forme de chaleur. Cette énergie serait très faible si le cylindre M' était constitué par du fer très doux, mais elle devient assez importante lorsque la matière employée est de l'acier à aimant dont la boucle d'hystérésis est très large. La dissipation totale de chaleur pendant une rotation *relative* de 1 tour dépend des facteurs suivants : volume du cylindre M', valeur de l'induction maximum et propriété magnétique de la matière aimantable employée. Cette dernière propriété est habituellement définie par le cycle d'hystérésis obtenu au moyen d'un échantillon en forme de tore sans entrefer (circuit magnétique parfait).

Soient Wh l'énergie perdue par cycle d'hystérésis et ω la vitesse relative. L'énergie dissipée par seconde, ou puissance dissipée au cours de $\omega/2\pi$ cycles, est :

$$P = W_h \times \frac{\omega}{2\pi}$$

Cette puissance est équivalente à C ω , C désignant le couple d'entraînement égal au couple de freinage. On a donc :

$$W_h \times \frac{\omega}{2\pi} = C\omega$$

ou $C = \frac{W_h}{2\pi}$ (indépendant de ω) —

On voit que le dispositif, figure 72a, constitue une transmission qui jouit d'une propriété remarquable : *le couple C entraînant le cylindre M demeure constant, quelle que soit la vitesse relative* ω . Par exemple, si l'on fait tourner l'aimant NS à une vitesse quelconque et si l'on immobilise M' au moyen d'un ressort dynamométrique, la déviation angulaire prend une valeur bien déterminée indépendante de la vitesse de NS¹⁵. Lorsque le mouvement de M' n'est pas limité mais se trouve gêné par un couple résistant Cr, la transmission peut se comporter de différentes façons :

Si $Cr < C$, le cylindre M', partant du repos, démarre spontanément en prenant une vitesse croissante.. Dès qu'il atteint la vitesse Ω_c de l'aimant, il conserve cette vitesse et *il ne se produit plus de glissement*; la transmission s'effectue comme dans le cas d'un accouplement *rigide* et, pendant la marche synchrone, il n'y a pas

15. Sur ce principe et basé l'hystérésimètre de Blondel.

de dissipation d'énergie en chaleur dans la masse entraînée, celle-ci restant aimantée dans une direction fixe.

Si $C_r > C$, le cylindre M' supposé au repos n'est pas actionné; s'il a été lancé, il perd sa vitesse jusqu'à l'arrêt.

Si C_r est un couple résistant variable qui croît proportionnellement à la vitesse du cylindre M' , ce dernier prend une vitesse de régime stable Ω_r inférieure à Ω_e , pour laquelle $C = C_r$, comme l'indique la figure 72d. Dans ce dernier cas, il se produit un glissement ($\Omega_e - \Omega_r$) qui varie lorsque la loi de C_r en fonction de la vitesse de B' est modifiée; mais le couple d'entraînement C reste toujours constant et l'hystérésis cause un dégagement de chaleur constant pour une rotation relative de un tour.

3° Analogies mécaniques des accouplements à courants de Foucault et à hystérésis.

La transmission de courants de Foucault, figure 72a, se comporte comme un embrayage à friction visqueuse par fluide interposé (voir

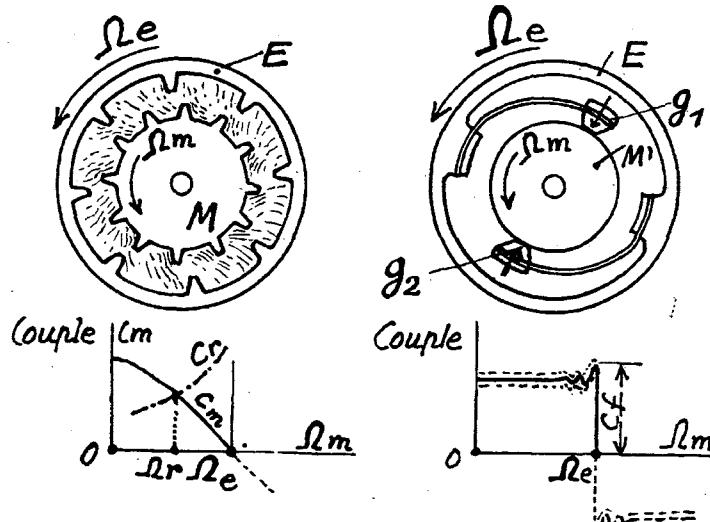


Fig. 73

Fig. 74

FIG. 73. — Entraînement par fluide visqueux, comparable au dispositif (fig. 71 a).
 FIG. 74. — Accouplement à friction analogue au dispositif (fig. 72 a). Le couple dû au frottement des sabots g_1 et g_2 se maintient à peu près constant quelle que soit la vitesse relative ($\Omega_m - \Omega_e$); ce couple change brusquement de signe lorsque le sens du déplacement relatif est inversé. En général, pour les très faibles glissements, le couple de friction est assez instable; le frottement au départ est généralement le plus grand. (La loi théorique de Coulomb suppose un coefficient de frottement constant; le fonctionnement idéal correspondant à cette loi est réalisé pratiquement au moyen du dispositif d'entraînement magnétique fig. 72 a.)

fig. 73). Les forces de frottement agissant sur le récepteur s'annulent en même temps que la vitesse relative, de sorte qu'il se produit toujours un glissement, l'organe entraîné n'étant jamais complètement libre.

La transmission à hystérésis, figure 72a présente les propriétés d'un embrayage à *frottement sec* (*fig. 74*). Lorsque le couple à vaincre est relativement faible, l'entraînement se produit par adhérence *sans glissement* comme dans le cas d'un accouplement rigide à griffes, mais, si le couple opposé dépasse une certaine valeur, le tambour récepteur patine et le glissement des sabots g_1 et g_2 cause une dissipation d'énergie. Le couple d'entraînement, pendant la marche avec glissement, resterait invariable si le travail de frottement pendant 1 tour de F était lui-même constant (frottement à sec obtenu par une pression constante lorsque le coefficient de frottement ne varie pas).

On remarquera que l'entraînement par hystérésis magnétique fournit le moyen de développer *un couple constant* à l'aide d'un moteur quelconque de puissance surabondante, tournant à une vitesse élevée. Cette propriété pourrait être utilisée, semble-t-il, pour opérer dans de parfaites conditions l'entretien de la tension constante d'un ressort-moteur agissant sur la roue d'échappement d'un mouvement d'horlogerie.

4° *Principe des moteurs asynchrones Ferraris et des moteurs synchrones Warren.*

Les moteurs Ferraris et les moteurs Warren fonctionnent comme les dispositifs figure 71a et figure 72a mais les aimants NS sont remplacés par des enroulements fixes qui engendrent des champs magnétiques tournants ou glissants. Ces moteurs sont généralement alimentés par des réseaux à courants alternatifs monophasés et l'on obtient le démarrage automatique en faisant agir sur le rotor deux champs magnétiques décalés dans le temps et dans l'espace. Les figures 75 et 80 montrent quelques stators typiques couramment utilisés.

Nous n'examinerons pas en détail les propriétés particulières de ces systèmes, cette étude ayant été faite dans cette revue¹⁶;

16. Jean Granier. — Caractéristiques de moteurs de remontage et de moteurs synchrones utilisés en horlogerie (*Annales françaises de chronométrie*, n° 1 1934, pp. 21-35). Voir aussi l'ouvrage *Pendules Électriques* (1935) par J. Granier, professeur à la Faculté des Sciences de Besançon (Dunod, éditeur), pp. 82-96.

nous nous bornerons à rappeler que les petits moteurs à disques ou à tambours conducteurs ont un rendement extrêmement bas. Par exemple, en consommant une puissance électrique de 2 watts, on produit sur un arbre tournant à une vitesse de l'ordre de 1 tour par seconde un couple d'environ 2 grammes au centimètre. La presque totalité de l'énergie dépensée (plus des 999/1.000) est dégradée en chaleur et celle-ci est assez nuisible car elle peut éléver notablement la température de l'huile de graissage surtout si le moteur est construit sous un trop faible volume. La puissance utile est fortement influencée par les variations de la tension d'alimentation. Ces inconvénients, il est vrai, sont largement compensés par les avantages pratiques qui résultent de la grande sim-

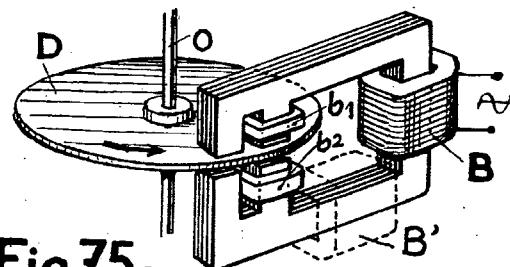


Fig. 75a

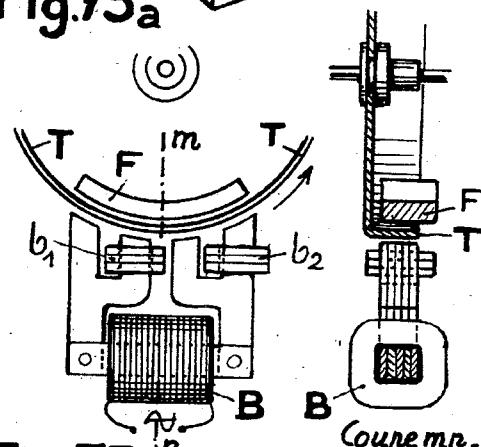


Fig. 75b

FIG. 75 a, 75 b. — Moteurs formés par un disque conducteur rotatif *D* (en cuivre ou en aluminium) dont le pourtour peut se déplacer dans l'entrefer d'un circuit magnétique feuilleté excité par un courant alternatif. La rotation est obtenue lorsqu'on entoure une partie de chaque pôle actif par une bague conductrice qui déphase en arrière le flux embrassé, (baguette dite « de retardement » ou baguette de *Frager*). Ces moteurs sont basés sur la célèbre expérience faite par Elihu Thomson en 1884, à l'Institut de Washington.

plicité du rotor, aussi le type de moteur considéré est-il très employé dans la construction des horloges électriques alimentées par le secteur.

Bien que la puissance développée soit très faible, elle est suffisante pour assurer en 3 ou 4 heures le remontage des barillets usuels qui permettent d'obtenir une réserve de marche de 40 heures et nécessitent des couples d'entraînement de l'ordre de 10 cm. kg. Il faut pour cela recourir à une grande démultiplication de vitesse, par exemple à un train d'engrenages, rapport 5.000/1 environ, comportant 3 axes intermédiaires¹⁷.

5° Moteurs d'induction à cages d'écureuil.

On peut accroître fortement la puissance massique des petits moteurs d'induction en remplaçant les rotors monométalliques précédemment étudiés par des rotors renfermant à la fois un métal très conducteur (cuivre ou aluminium) et un métal magnétique (fer ou acier spécial); ce qui permet de mettre en jeu un flux inducteur plus intense. On utilise notamment des moteurs type figures 76 et 77 dont le rotor est formé par un tube en cuivre ou en aluminium entourant un noyau cylindrique en fer ou en acier. On emploie aussi la disposition inverse ainsi que des disques accolés d'aluminium et d'acier. Avec une puissance de l'ordre du watt, on obtient sur l'arbre tournant à la vitesse d'environ 30 tours par seconde un couple de l'ordre de 0,5 centimètre-gramme.

Le rendement est 5 à 10 fois plus grand que celui des moteurs Ferraris de même consommation. En revanche les fortes attractions magnétiques entre rotor et stator produisent souvent des vibrations nuisibles.

Une puissance mécanique encore plus élevée est obtenue avec des rotors en cages d'écureuil analogues aux rotors des moteurs industriels d'induction; cette construction permet d'atteindre des rendements de l'ordre de 1,5 à 2 pour cent. Lorsque les conducteurs de la cage d'écureuil sont logés dans des encoches périphériques, il faut éviter que les variations périodiques de la réluctance du circuit magnétique n'entraînent des oscillations de vitesse

17. L'application des moteurs à disque au remontage des horloges a fait l'objet d'une étude approfondie dans la thèse de M. Alexandre Bertrand (1934) intitulée « Utilisation des Réseaux de Distribution d'Énergie Electrique en Chronométrie », étude analysée dans les *Annales françaises de chronométrie*, 1934, n° 4 (tome 4, p. 343).

et des chocs répétés des dents d'engrenages. Ces inconvénients sont évités en inclinant les encoches du rotor contenant les barres con-

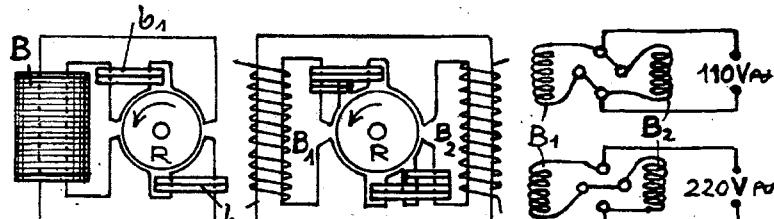


Fig.76a

Fig.76b

Fig.76c

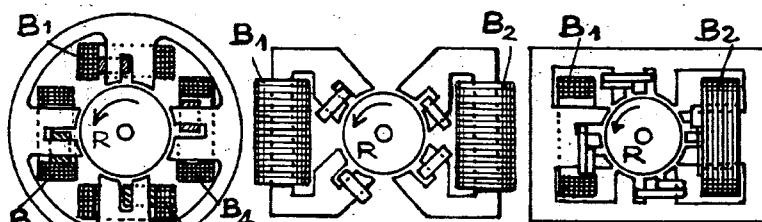


Fig.77a

Fig.77b

Fig.77c

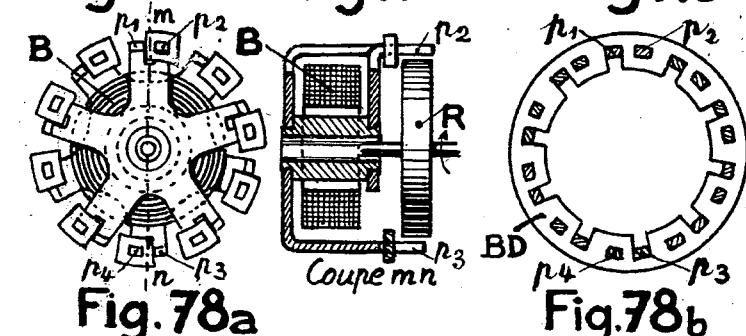


Fig.78a

Fig.78b

FIG. 76 a à 76 b. — Moteurs à champs elliptiques reposant sur le principe découvert par Ferraris en 1885. Les fig. 76 a et 76 b représentent un moteur bipolaire excité par une ou par deux bobines. La fig. 76 c montre les modes de branchement de deux parties d'un enroulement inducteur, qui permettent de faire fonctionner le moteur avec l'une ou l'autre de deux tensions alternatives usuelles 110 V ou 220 V. Les fig. 77 a, 77 b et 77 c représentent les moteurs tétrapolaires, tournant deux fois moins vite que les moteurs (fig. 76). La fig. 78 a représente un moteur multipolaire (5 paires de pôles) dont le stator est excité par une seule bobine centrale B. Au lieu de munir une partie de chaque pôle du stator, telle que p_2 et p_4 , d'une bague de déphasage, on peut employer une seule couronne de cuivre découpée comme l'indique la fig. 78 b. Les flux issus des parties des pôles telles que p_1 et p_3 ne sont pas déphasés.

Les stators des moteurs représentés peuvent permettre de réaliser soit des moteurs Ferraris à rotor en aluminium ou en cuivre ou des rotors à cages d'écuréuil, soit des moteurs synchrones du type à hystérésis, principes fig. 71 a et 72 a.

ductrices¹⁸. Un moteur à cage, dont la consommation est d'environ 6 watts, permet de remonter un fort ressort de barillet en une minute, tandis que les moteurs Ferraris usuels exigent des durées de remontage de plusieurs heures.

Pour le remontage des horloges monumentales à poids, on emploie fréquemment des moteurs d'induction types industriels

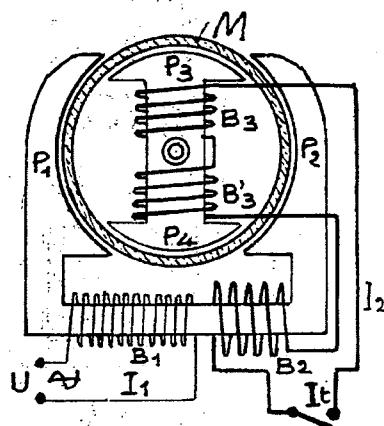


Fig. 79

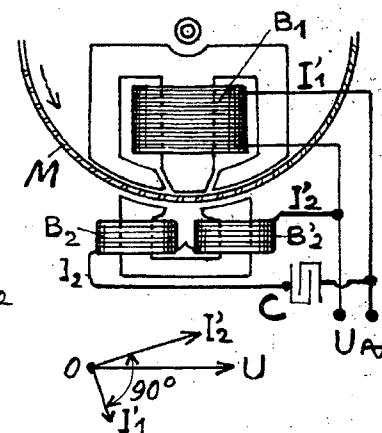


Fig. 80

FIG. 79.—Moteur Ferraris à courants alternatifs diphasés I_1 et I_2 , obtenus au moyen d'une tension monophasée. Le courant I_2 est développé par induction, les bobines B_1 et B_2 enroulées sur un noyau commun se comportant comme un transformateur. L'induit en cloche M peut être mis en marche et arrêté en agissant sur l'interrupteur I_t fonctionnant à très basse tension.

FIG. 80.—Moteur Ferraris, analogue à un moteur de compteur à champ glissant, fonctionnant aussi avec une tension monophasée. Le courant I_2 en quadrature avec le courant I_1 est obtenu au moyen d'un condensateur C . Cette disposition permet d'augmenter le couple moteur exercé sur un induit M d'aluminium en forme de cloche ou de disque; toutefois le rendement et la puissance massique restent faibles car les longueurs d'entrefer et les fuites magnétiques sont importantes (une perte d'au moins 99 pour 100 de l'énergie consommée est convertie en chaleur).

d'une puissance utile de 50 W à 1 kW. La figure 81 rappelle l'allure des courbes caractéristiques *couple-vitesse* de ces moteurs. Il est toujours préférable d'adopter des moteurs très largement calculés et construits avec des entrefers relativement grands; pour les applications horlogères, en effet, l'amélioration de la robustesse est beaucoup plus importante que la réduction de la con-

18. Un moteur perfectionné de ce type, construit par la Compagnie des Compteurs, a été décrit par M. Fiora dans les *Annales françaises de chronométrie*, 1946, p. 184, figure 3.

sommation électrique. En général, il vaut mieux choisir un rotor de forte résistance afin d'augmenter le couple de démarrage car les frottements au départ des mécanismes rustiques à marche intermittente sont souvent anormalement élevés.

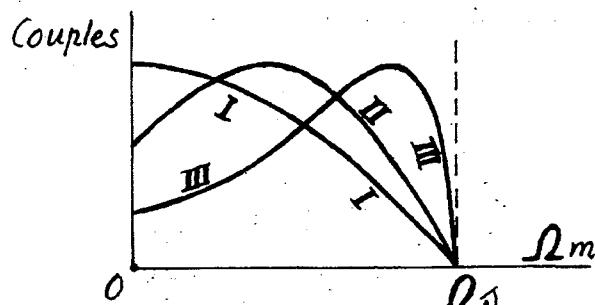


Fig. 81

FIG. 81. — Courbes caractéristiques couple-vitesse des moteurs industriels d'induction à champs tournants et à induits bobinés. *Courbe I*, cas d'un rotor de résistance élevée; *courbe III*, cas d'une résistance très faible. La courbe I est analogue à celle d'un moteur Ferraris à rotor en matière conductrice. L'allure de la courbe (fig. 3) s'explique par le fait que les conducteurs du rotor sont noyés dans un cylindre en fer feuilleté; au démarrage le courant induit dans le rotor est approximativement *en quadrature* avec le champ inducteur et, bien qu'il soit très intense, il ne produit pas sensiblement de couple. L'augmentation de résistance diminue l'intensité au démarrage, mais elle change la phase et permet ainsi une augmentation du couple.

6° Moteurs à collecteurs.

En raison de la diversité des courants distribués par les réseaux de transport d'énergie, il est parfois utile de choisir des moteurs de remontage capables de fonctionner indifféremment avec les tensions continues et alternatives (moteurs dits « universels »). On a cherché à utiliser des moteurs très simplifiés dont le rotor est constitué par une roue dentée feuilletée en fer (principe des anciens moteurs Jacobi et Froment à électro-aimant munis d'armatures rotatives).

La figure 82 représente, à titre d'exemple, les principaux organes d'un remontoir d'horloge de ce genre¹⁹. L'organe délicat, exposé à usure rapide, est évidemment le contact périodique, car les coupures répétées du circuit d'un électro-aimant très inductif donnent lieu

19. Système décrit par le Dr. Ing. Baltzer dans la Revue *Deutsche Uhrmacher Zeitung* (n° du 27 octobre 1934, p. 540).

à de très fortes étincelles²⁰. On pourrait probablement améliorer le fonctionnement du dispositif considéré en remplaçant l'électro-aimant à fer doux par un électro-aimant à armature polarisée étudié de façon que la réluctance du circuit magnétique reste à peu près constante pour toutes les positions du rotor.

A notre connaissance les moteurs type figure 82 ne sont pas

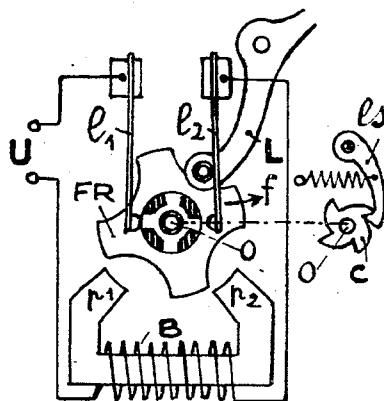


Fig. 82

FIG. 82. — Remontoir par moteur à impulsion à armature tournante *FR*, du type ancien Froment. Après chaque remontage, la lame *l₂* de l'interrupteur rotatif est écartée du distributeur par le levier d'arrêt *L*, pouvant être commandé par divers dispositifs (voir figures suivantes). Le cliquet sautoir *ls* impose à l'axe *O* de l'armature *FR* des positions de départ favorables.

employés couramment; on utilise surtout des moteurs universels classiques à collecteurs, avec excitation série et induits en tambour. La construction de ces moteurs doit être particulièrement bien soignée. Les enroulements sont souvent prévus pour plusieurs tensions d'alimentation, résultat obtenu soit en ajoutant des résistances supplémentaires, soit en changeant le mode de couplage des bobines du stator.

7° Petits moteurs synchrones rotatifs.

Les horloges de commutation destinées à fonctionner au moyen de courants alternatifs dont la fréquence moyenne est maintenue

20. Cette question a été longuement étudiée dans cette revue à propos de l'examen des remontoirs par électro-aimants ordinaires (n° 3-4, 1944, pp. 124 à 137).

rigoureusement constante peuvent à la fois être remontées et maintenues à l'heure par des moteurs synchrones à auto-démarrage tournant constamment.

Divers systèmes permettent d'obtenir ce résultat; les figures 83a et 83b représentent, à titre d'exemple, une solution peu connue qui permet, d'une part, d'assurer le remontage limité d'un ressort-moteur servant de réserve d'énergie, et, d'autre part, d'opérer la synchronisation d'un petit balancier circulaire par une action mécanique sur le spiral réglant ou sur un spiral auxiliaire.

On sait que la synchronisation des horloges actionnées par des moteurs asynchrones à marche intermittente peut être obtenue indépendamment des organes de remontage au moyen d'un champ magnétique alternatif ou ondulé agissant sur une pièce en fer doux ou sur un petit aimant fixé sur le balancier. Nous ne rappellerons pas les divers modes de réalisation de ce système, ceux-ci, ayant déjà fait l'objet de plusieurs études dans cette revue²¹, mais nous voudrions insister ici sur la possibilité d'éviter les difficultés de la synchronisation sous-harmonique des oscillateurs de fréquences horlogères par les courants alternatifs de fréquences beaucoup plus élevées. Au moyen d'un petit moteur synchrone chargé de remonter l'horloge, et, éventuellement, d'engrenages démultiplieurs, il est très facile d'obtenir *une action de période égale à celle des balanciers des pendules et des montres*; il est possible, de plus, d'éviter l'adjonction sur le balancier ou sur l'échappement d'organes délicats qui peuvent troubler la marche autonome de secours.

Nous avons étudié des particularités de construction²² qui rendent possible la mise hors d'action temporaire des dispositifs correcteurs de cadence et permettent de créer des horloges à longue réserve de marche et à synchronisation-secteur facultative. Ces systèmes répondent actuellement à un besoin car l'insuffisance de la production d'énergie électrique cause souvent des interruptions de courant et ne permet pas de maintenir de contrôle chronométrique de la fréquence des réseaux pendant certaines périodes de forte charge des usines centrales.

Pour la bonne réalisation du dispositif représenté figure 83b, il est important de choisir un moteur synchrone très stable, capable

21. Ces systèmes ont été comparés dans notre article « Etude des procédés de synchronisation des balanciers d'horloges et autres oscillateurs mécaniques » *Revue Générale de l'Electricité* des 27 octobre et 3 novembre 1934, t. XXXVI, pp. 563-575 et 607-623.

22. Demandes de brevets en cours.

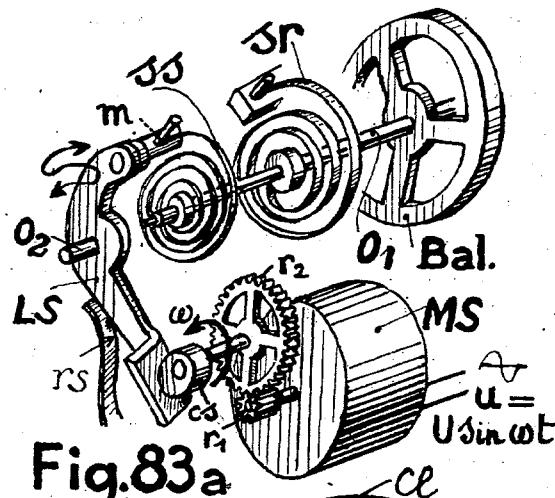


Fig. 83a

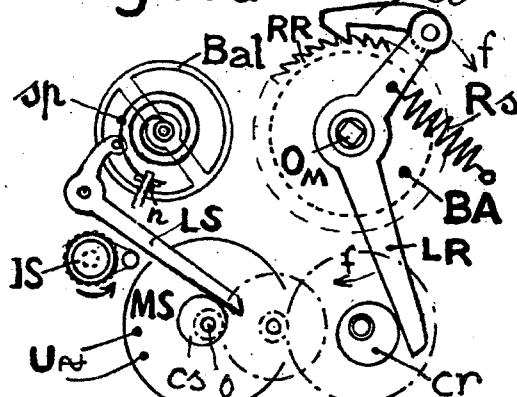


Fig. 83b

FIG. 83 a. — Croquis schématique d'un dispositif de synchronisation continue d'un balancier circulaire *Bal* associé à un spiral réglant *sr*, au moyen d'un petit spiral auxiliaire *ss* dont l'extrémité extérieure *m* est fixée sur le levier *LS* animé d'un mouvement oscillatoire de très faible amplitude; ce mouvement est communiqué par la came *cs* actionnée par un moteur synchrone multipolaire *MS*. Ce dispositif doit être établi de façon que la période *T_s* de *LS* soit celle que l'on se propose d'imposer au balancier *Bal*, dont la période propre est voisine de *T_s*. Ce résultat est obtenu par le choix du nombre *n* de paires de pôles du moteur et du rapport de de vitesse *r₂/r₁*, en tenant compte de la fréquence *f* de la tension-secteur et de la période moyenne idéale *T_s* du balancier.

$$\text{On doit avoir : } T_s = \frac{n}{f} \times \frac{r_2}{r_1}$$

Le mode d'action du spiral *ss* est analogue à celui du dispositif d'entretien appliqué aux chronomètres à balanciers libres, système Riefler (décrir *(Voir la suite des légendes à la page suivante)*).

de développer un couple moteur important et de subir des surcharges passagères sans risque de décrochage. Rappelons à ce sujet, que l'on emploie dans les horloges synchrones trois types principaux de moteurs :

- a) les moteurs à hystérésis ,type Warren(principe *fig. 72a*);
- b) les moteurs « asynchrones synchronisés » comportant un dispositif entraîneur à courants de Foucault (*fig 71a*) associé à un régulateur de vitesse « roue phonique » en fer doux ou en acier faiblement aimanté;
- c) les moteurs magnéto-électriques multipolaires, analogues aux moteurs industriels hétéropolaires à inducteurs fortement polarisés, qui démarrent automatiquement après quelques vibrations d'amplitude croissante²³.

A notre avis les moteurs à hystérésis, ainsi que les systèmes à entraînement par courants de Foucault ne conviennent pas bien car leur puissance motrice est minime et les rotors tournent souvent en dehors de la vitesse de synchronisme normale; il est préférable d'employer des moteurs synchrones à rotors préaimantés constitués par les nouvelles matières à aimant de très haute coercitivité; on obtient ainsi une marche synchrone sûre avec une puissance motrice comparativement très importante, comme le montrent les résultats d'essais suivants :

Un moteur bipolaire à hystérésis (construction A.E.G.) consommation 2,5 W) dont le rotor tourne à 3.000 t/mn produit à cette

dans le tome II de *Pendule-Spiral-Diapason* (Bouasse), p. 85). Le couple périodique moteur exercé sur O_1 impose au balancier un régime d'oscillations forcées voisin de la résonance et très stable. On peut obtenir une grande amplitude favorisant la sûreté de marche de l'horloge.

FIG. 83 b.— L'expérience montre que la synchronisation de *Bal* peut aussi être obtenue par une petite pression périodique de cadence T_s sur la spire extérieure du spiral *sp*, au voisinage de l'attache *n*. En choisissant T_s et le nombre de *n* de paires de pôles de *MS*, l'axe du moteur peut manœuvrer directement la came *cs* et actionner par intermittence un levier *LR* chargé de remonter le barillet *BA* du mécanisme horaire. La tension du ressort-moteur est aisément limitée par la flexibilité du ressort de rappel *Rs*, réglée de façon que le cliquet *cl* ne se déplace plus en sens *f* lorsque le barillet est suffisamment remonté. On voit qu'un petit moteur de couple relativement élevé permet de synchroniser et de remonter une horloge avec un mécanisme très réduit. (Demande de brevet en cours.)

23. La fabrication du moteur des types C a pris récemment un très grand développement en Angleterre (moteurs Ferranti et Smith) et aux Etats-Unis (moteurs GEC^o). Nous avons étudié les moteurs synchrones polarisés dans les *Annales françaises de chronométrie*, n° 3, 1938 (tome 8, pp. 167 à 180).

vitesse un couple de démarrage inférieur à 0,1 cm. gr; un modèle analogue de même consommation, dont le stator comporte 8 paires de pôles, développe sur son axe (vitesse 375 t/mn) un couple de démarrage d'environ 1,5 cm. gr. Au moyen d'un moteur de même volume à 15 paires de pôles (consommation 2 W, vitesse 200 t/mn) muni d'un rotor polarisé par un aimant bipolaire en acier au nickel-aluminium, nous avons obtenu un couple de démarrage supérieur à 50 cm. gr., c'est-à-dire une puissance utile environ 30 fois plus élevée, à égalité de consommation.

Cette forte augmentation du couple s'explique aisément par des remarques analogues à celles que nous avons exposées précédemment au sujet des électro-aimants polarisés et non polarisés. Les résultats de l'étude comparative des petites machines rotatives peuvent être résumées de la façon suivante :

Les moteurs électromagnétiques de tous systèmes produisent des couples instantanés de la forme

$$C = ki\Phi$$

i désignant le courant consommé et Φ représentant un certain flux *utile* qui peut provenir soit d'un circuit inducteur spécial, soit d'une forte aimantation permanente communiquée aux pôles inducteurs, soit du flux engendré par le courant consommé. Dans ce dernier cas, si l'on admet que le flux inducteur est à peu près proportionnel au courant i , on a

$$C = k i^2.$$

Or, les machines minuscules comportent des entrefers relativement grands et les flux magnétiques pouvant être engendrés par les faibles courants sont infimes. Dans ces conditions les courbes représentant la variation des couples en fonction des courants consommés se présentent comme l'indique la figure 84. On voit que les moteurs excités par de forts aimants permanents sont susceptibles de produire pour les faibles valeurs de i des couples relativement très élevés. Ce résultat, toutefois, n'est obtenu qu'à la condition d'atténuer les fuites magnétiques et d'éviter les fortes variations cycliques de réluctance lorsque le rotor franchit un pas polaire.

La réalisation de petits moteurs synchrones très puissants paraît susceptible de faciliter, dans l'avenir, la création de divers types d'horloges de commutation à réserve de marche normalement syn-

chronisées par le secteur ou par des émissions spéciales de fréquences constantes²⁴.

En effet, plusieurs systèmes connus permettent de corriger la marche des aiguilles d'une horloge au moyen d'un moteur syn-

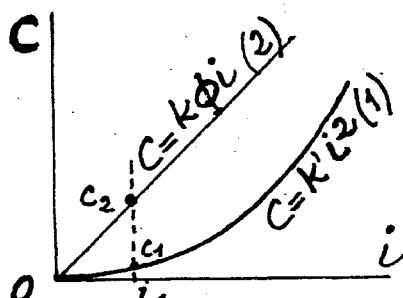


Fig. 84

FIG. 84. — Allures générales des courbes du couple des moteurs électromagnétiques en fonction de l'intensité i traversant l'induit. Courbe (1) : moteurs dont le flux inducteur est engendré par i ; courbe (2) : moteurs dont le flux inducteur provient d'un aimant permanent. Pour les très faibles courants, tels que i_1 , les moteurs fortement polarisés fournissent des couples relativement très élevés.

chrone. Indépendamment des procédés de synchronisation dérivant des solutions fondamentales indiquées par Foucault, Jones et Shortt, on a proposé d'autres dispositifs qui agissent soit sur la longueur active du spiral associé au balancier régulateur, soit sur le mécanisme de transmission, par rectification périodique du calage d'un organe mobile entraîné par un embrayage à friction²⁵. Nous

24. A ce sujet, nous voudrions attirer l'attention sur l'importance du progrès technique que permettrait d'obtenir une forte amélioration du rendement des petits moteurs synchrones alimentés par les secteurs à courants alternatifs. Considérons par exemple un petit moteur de $5 \times 5 \times 5$ cm. consommant 2 W c'est-à-dire le centième de la puissance d'une lampe usuelle d'éclairage et calculons le travail qu'il pourrait développer s'il fonctionnait avec un rendement électrique de 0,5 (rendement des moteurs O'K employés par Ch. Poncet). On sait que $1 \text{ kgm./s.} = 9,81 \text{ W}$. Cette relation permet d'évaluer le travail mécanique utile obtenu au moyen d'un train d'engrenages de rendement de 0,25 faisant tourner un axe à la vitesse de 1 tour par minute. On trouve ainsi que le moteur peut développer sur cet axe un couple équivalent à une force de 250 grammes agissant sur un bras de levier de 1 mètre. Cette puissance permet d'actionner avec une grande sécurité les aiguilles d'un cadran de clocher de plusieurs mètres de diamètre.

25. Des correcteurs agissant sur des raquettes de réglage sont décrits dans les brevets suivants : n° 1.328.247 (U.S.A.) de A. Poole (1917); n° 183.732 (Suisse) Sauter (1935).

Des dispositifs à remises à l'heure fréquentes par moteurs synchrones sont décrits dans les brevets suivants : n° 742.483-43.212 (1931) des Etablissements Hatot, n° 166.848 (Allemagne, 1931) de Siemens-Schuckert.

nous bornerons à citer ces systèmes qui, à notre connaissance, n'ont pas encore été construits à l'échelle industrielle.

Nous mentionnerons aussi les mouvements doubles à réserve de marche qui renferment un rouage-compteur actionné par un moteur synchrone et un mécanisme horaire complet de secours, mis automatiquement en activité pendant les pannes de secteur. Ces derniers appareils sont constitués par les organes que nous avons étudiés précédemment et comportent, en plus, un dispositif permuteur automatique. Un modèle de ce genre a déjà été décrit dans cette revue²⁶.

(Suite et fin dans le prochain numéro.)

26. Nimier. — Applications particulières des moteurs synchrones aux problèmes d'horlogerie. Modèle d'horloge synchrones à réserve de marche des Ateliers Brillé Frères. *Annales françaises de chronométrie*, n° 2, 1934, tome 4, pp. 143 et 159.

Des modèles d'horloges synchrones du type à deux mouvements sont décrits dans les brevets n° 77.533, 1934 et 840.695, 1938 de la maison Landis et Gyr. Dans le système perfectionné établi selon le brevet n° 840.695, le mécanisme horaire à balancier est libéré périodiquement, ce qui évite l'insécurité de marche des appareils dans lesquels le mouvement de secours risque de ne pas démarrer en temps utile, par suite de l'altération de l'huile (gomme) pendant des arrêts trop prolongés du balancier.