

A. FAVARGER

Ingénieur

L'ÉLECTRICITÉ

et ses applications à la

CHRONOMÉTRIE

344 figures dans le texte et 8 planches hors texte.

Troisième édition revue et augmentée.



NEUCHÂTEL

ÉDITIONS DU JOURNAL SUISSE D'HORLOGERIE ET DE BIJOUTERIE

Dépositaires pour la France et la Belgique :

PARIS

LIBRAIRIE CENTRALE DES SCIENCES GIRARDOT & C^{ie}

27, Quai des Grands-Augustins

1924

Tous droits réservés.

L'ÉLECTRICITÉ

ET SES

APPLICATIONS A LA CHRONOMÉTRIE

PAR

A. FAVARGER

INGÉNIEUR

Avec 344 figures dans le texte et 8 planches hors texte.

TROISIÈME ÉDITION REVUE ET AUGMENTÉE



NEUCHÂTEL

ÉDITIONS DU JOURNAL SUISSE D'HORLOGERIE ET DE BIJOUTERIE
1924

Tous droits réservés.

L'ÉLECTRICITÉ

ET SES

APPLICATIONS A LA CHRONOMÉTRIE

PAR

A. FAVARGER

INGÉNIEUR

Avec 344 figures dans le texte et 8 planches hors texte.

TROISIÈME ÉDITION REVUE ET AUGMENTÉE

NEUCHÂTEL

ÉDITIONS DU JOURNAL SUISSE D'HORLOGERIE ET DE BIJOUTERIE
1924

Tous droits réservés.

PRÉFACE DE LA PREMIÈRE ÉDITION

Les pages qu'on va lire sont la réunion d'une série d'articles qui ont paru dans le *Journal suisse d'Horlogerie*.

Ce travail, destiné à un public peu familiarisé avec les questions spéciales d'électricité, a été divisé en deux parties.

L'une, théorique, passe rapidement en revue les notions élémentaires concernant les sources d'électricité, les effets et les lois des courants voltaïques.

L'autre, pratique, étudie les diverses applications que l'on a faites de l'électricité à la chronométrie, et cherche avant tout à donner une idée exacte de l'état actuel de cette branche importante de l'électro-technique.

A. F.

PRÉFACE DE LA DEUXIÈME ÉDITION

L'auteur a mis à profit l'occasion que lui offrait la réimpression de son ouvrage, pour le compléter par l'adjonction de divers chapitres et paragraphes concernant les uns la mesure des résistances et des forces électro-motrices, les autres les études préliminaires, l'installation et l'entretien d'un réseau public d'horloges électriques. Il a, en outre, donné la description d'un nouvel appareil, le pendule à étoile artificielle, qui a pour but l'étude des équations personnelles des astronomes. Enfin, il a notablement augmenté et amélioré les figures qui accompagnaient le texte primitif.

Il a cherché ainsi à agrandir le cercle de ses lecteurs qui, à l'origine, était surtout composé d'horlogers (abonnés du *Journal suisse d'Horlogerie* paraissant à Genève; voir la préface de la première édition) et d'élèves des écoles d'horlogerie de langue française.

Les nombreux renseignements pratiques qu'il donne au chapitre VIII, et qui sont le résultat d'une longue expérience personnelle, intéresseront de préférence les personnes appelées à s'occuper, d'une manière ou d'une autre, de l'installation et de l'entretien de réseaux d'horloges électriques (directeurs d'observatoires, administrateurs de villes, ingénieurs, horlogers-électriciens, monteurs, etc.).

NEUCHÂTEL, décembre 1891.

A. F.

PRÉFACE DE LA TROISIÈME ÉDITION

Depuis que les premières éditions de la présente étude sur les applications de l'électricité à la mesure et à la distribution du temps ont été publiées à Genève par le Comité-Directeur du *Journal suisse d'Horlogerie*, il s'est écoulé plus de trente années. Ce laps de temps a suffi pour modifier entièrement quelques-unes des faces du problème que l'auteur soussigné s'était efforcé d'élucider en 1886 et 1892. Rien d'étonnant, dès lors, si une nouvelle édition du même ouvrage se présente aujourd'hui sous l'aspect d'un volume ayant un nombre de pages et de figures environ trois fois plus grand que celui de l'édition primitive.

Divers événements scientifiques et techniques d'une grande importance ont contribué à augmenter considérablement les matières dont l'auteur a dû s'occuper pour mettre au point son premier travail. Mentionnons entre autres : les études de M. Ch.-Ed. Guillaume sur les propriétés des alliages d'acier et de nickel, et d'acier et de chrome, études qui ont abouti au bouleversement des méthodes de compensation employées jusqu'alors pour rendre les organes régulateurs des horloges et des montres indépendants des variations de la température ; — l'invention sensationnelle de nouveaux dispositifs électriques permettant de substituer les *ondes hertziennes* aux lignes télégraphiques presque exclusivement employées, avant Marconi, pour transmettre à des distances quelconques la pensée écrite ou parlée ; — les progrès réalisés depuis 1886 dans le vaste domaine des

générateurs, transformateurs et récepteurs des courants électriques et dans celui, plus restreint, des appareils électrochronométriques proprement dits, etc.

Mais l'événement qui a le plus fortement contribué à créer la situation actuelle est incontestablement la grande guerre de 1914-1918. Si, d'une part, celle-ci a donné un élan extraordinaire à diverses branches de la technique militaire et civile, elle a, d'autre part, détruit, pendant les quatre années de sa durée, une portion énorme des richesses que l'homme avait réussi à accumuler au cours d'une longue période de paix relative et de prospérité croissante, — si bien que le monde d'aujourd'hui, comparé à celui d'avant-guerre, semble n'être plus qu'un amas de ruines, de misères et de souffrances.

On se trouve ainsi en présence de cette impérieuse nécessité : reconstituer par un travail intense et persévérant les richesses disparues.

Comment pourra-t-on arriver à ce résultat, tout au moins en ce qui concerne les pertes matérielles ? En améliorant les méthodes de travail, c'est-à-dire en leur assurant un rendement supérieur à celui dont on pouvait se contenter avant la guerre.

Il est évident qu'une telle amélioration ne pourra être obtenue qu'en remplaçant, le plus possible, l'effort manuel — et parfois même intellectuel — de l'homme par celui de la machine.

La science de la mécanique nous apprend que plus est court *le temps* pendant lequel une machine quelconque effectue un *travail* donné, plus est élevé le rendement de cette machine. Mais le travail lui-même contient la *force* comme facteur essentiel.

Laissons ici de côté le facteur *force*, à la création et à l'intensification duquel se sont appliqués et s'appliquent encore aujourd'hui avec un succès croissant d'ingénieux esprits et de nombreux travailleurs manuels (usines de génération et de distribution de l'énergie sous ses différentes formes : électrique, thermique, mécanique, chimique, —

mines de charbon et de pétrole, — captation et accumulation des eaux des fleuves, des rivières, des glaciers, etc.).

Actuellement, c'est l'autre facteur, le *temps* et sa connaissance exacte et continue, qui doit être plus que jamais, selon nous, l'objet de la sollicitude des reconSTRUCTEURS du monde économique.

Le temps ne peut être défini *en substance* ; il est, métaphysiquement parlant, aussi mystérieux que la matière et l'espace. Et cependant, il faut continuellement compter avec lui ; toutes les activités de l'homme, qu'elles soient conscientes ou inconscientes, qu'elles se nomment travail, méditation, sommeil, sustentation, divertissement, etc., se passent dans le temps. Si ces activités se succèdent sans ordre, sans plan défini, sans programme arrêté d'avance et en chevauchant, pour ainsi dire, les unes sur les autres, l'homme tombe dans l'anarchie, dans la misère physique, intellectuelle et morale. On en a fait, au sortir de la guerre, la cruelle et décisive expérience.

Si donc on veut que l'homme puisse vivre et prospérer, même au milieu des circonstances politiques et économiques les plus défavorables, il faut le rendre *maître du temps*, maître non pas seulement de l'heure, mais aussi de la minute, de la seconde et même, dans certains cas spéciaux, du dixième, du centième, du millième, du millionième de seconde.

Mais il ne suffit plus aujourd'hui de *mesurer* et de *déterminer* le temps avec la précision qui est de rigueur dans un observatoire astronomique ; il faut encore le *distribuer*, autrement dit, le mettre à la portée immédiate de tous ceux qui ont intérêt à le connaître. Il faut, en un mot, le vulgariser, le *démocratiser*.

Voici bientôt quatre-vingts ans que de nombreux inventeurs et constructeurs ont commencé à s'occuper et s'occupent encore de la distribution généralisée et plus ou moins automatique de l'heure exacte. Les progrès réalisés dans cette voie difficile ont été tantôt incertains et lents,

tantôt décisifs et rapides. D'innombrables dispositifs ont été conçus, exécutés et essayés avec plus ou moins de succès : les uns, ceux du début, étaient purement *mécaniques* (axes, engrenages, câbles de transmission, etc.); ils n'ont abouti à rien de pratique; — d'autres, plus modernes, consistaient en tuyaux dans lesquels circulaient régulièrement les pulsations d'un fluide liquide ou gazeux, lancées dans des récepteurs horaires appropriés, par des machines spéciales; — d'autres dispositifs enfin étaient *électriques*. Ce sont ces derniers qui, seuls, ont résolu le problème d'une manière complète et satisfaisante et qui, seuls aussi, ont donné naissance à une littérature offrant un intérêt à la fois historique, scientifique, technique et économique.

. . .

En ce qui concerne le mode d'exposition à employer ici, l'auteur a estimé que la tâche d'un écrivain technique, désireux d'être utile à ceux qu'intéresse la spécialité à laquelle il s'est lui-même voué, est de mettre ses lecteurs en possession de quelques principes généraux qui puissent les guider dans le labyrinthe des inventions se rapportant à l'objet de son étude.

Ces principes doivent, d'une part, s'appuyer sur un exposé théorique préliminaire tenant compte, dans la mesure nécessaire, des progrès accomplis récemment en électricité générale, et, d'autre part, servir eux-mêmes de point de départ à une classification simple et rationnelle des innombrables appareils électrochronométriques qu'il s'agissait de faire connaître ou de rappeler.

L'auteur ne se flatte pas d'avoir atteint entièrement le but qu'il s'était proposé et qu'il vient d'esquisser à grands traits. Il sait d'avance que son œuvre pourrait bien présenter, ici ou là, des défauts, des erreurs peut-être, et certainement des lacunes. Il s'en excuse dès maintenant auprès de ses lecteurs, en les priant de considérer que ni l'infailibilité, ni la perfection ne sont de ce monde, que la

science et la technique progressant continuellement, ce qui était bon et pratique à un moment donné, peut fort bien ne l'être plus le lendemain, qu'enfin le *temps*, objet de cette étude, pouvant être tantôt *producteur* (en se faisant petit) des rendements élevés dont on parlait tout à l'heure, tantôt *destructeur* naturel d'erreurs passées autrefois inaperçues, — son rôle dans le monde est, en fin de compte, bienfaisant. Honneur et gloire à ce bon collaborateur de l'homme qu'est le Temps !

NEUCHÂTEL, juillet 1923.

A. F.

Les sources d'électricité sont nombreuses ; on peut les diviser en sources mécaniques, chimiques et physiques.

Les *sources mécaniques* sont le frottement, la pression et la séparation des molécules des corps : un bâton de cire à cacheter ou un tube de verre que l'on frotte avec un morceau de drap, acquièrent la propriété d'attirer et de repousser les corps légers ; un morceau de sucre que l'on casse produit, dans l'obscurité, une lueur due à l'électricité dégagée au moment de sa rupture.

Les *sources chimiques* sont en jeu dans les combinaisons de deux ou plusieurs substances différentes : les métaux, comme le zinc, le fer, etc., plongés dans un acide, sont attaqués par lui et cette réaction donne naissance à des courants électriques (piles hydro-électriques).

Les *sources physiques* sont la chaleur, le magnétisme et l'électricité elle-même : deux métaux différents, soudés ensemble et chauffés inégalement, développent de l'électricité (piles thermo-électriques) ; un aimant, que l'on approche ou éloigne d'un fil métallique, engendre dans ce dernier des courants électriques (induction) ; les corps électrisés agissent sur ceux qui sont placés dans leur voisinage plus ou moins immédiat, et électrisent ceux-ci par influence (condensation, induction), etc.

Lorsqu'on frotte l'un contre l'autre deux corps différents, tous deux s'électrisent, l'un positivement, on lui donne le signe +, l'autre négativement, on lui donne le signe —. L'électricité dite positive est aussi appelée *vitrée*, parce qu'elle se développe sur le verre poli, lorsqu'on frotte celui-ci avec une étoffe de laine ; l'électricité négative est parfois appelée *résineuse*, parce qu'on la trouve à la surface d'un bâton de résine qu'on a préalablement frotté de la même façon.

que parfait entre les deux ordres de phénomènes, si bien qu'on put dès lors faire rentrer l'optique dans le domaine de l'électricité, et établir notamment que l'électricité est un mouvement vibratoire dont la vitesse de propagation est égale à celle de la lumière, à savoir trois cent mille kilomètres par seconde, et que les ondes ou oscillations électriques ne diffèrent des ondes lumineuses que par leurs longueurs et leurs périodes. Les premières ont une échelle de fréquences qui va de quelques unités à plusieurs milliards et ne sont d'ailleurs accessibles à aucun de nos sens. Les secondes, qui sont perçues par l'œil, sont plus rapides encore, leurs périodes atteignant jusqu'à cinq cent trillions par seconde.

Le son, qui est aussi un mouvement vibratoire, ne peut se propager que dans un milieu pondérable tel que l'air, l'eau, etc., et s'éteint dans le vide. Les ondes électriques et lumineuses, au contraire, franchissent le vide et notamment les espaces célestes ; c'est ce qui a conduit les savants à admettre hypothétiquement l'existence d'un milieu impondérable, *l'éther*, jouissant de propriétés spéciales et répandu partout, même à l'intérieur des corps.

Deux corps chargés d'électricités de même signe *se repoussent*. Deux corps chargés d'électricités de signe contraire *s'attirent*.

Une charge d'électricité développée par frottement soit sur le verre, soit sur la résine, reste localisée aux points frottés ; mais si l'on prolonge par une tige de cuivre le bâton vitreux ou résineux, et que l'on frotte le tout en tenant dans la main le bout de verre ou de résine, on constate que la partie du bâton prolongé qui est en cuivre, s'électrise sur toute sa longueur. On est ainsi amené à faire une distinction entre un corps *mauvais conducteur* de l'électricité, tel que le verre ou la résine, et un corps *bon conducteur* de ce fluide, tel que le cuivre. Des expériences analogues faites avec différents corps ont permis de constater que tous les métaux, le bois, l'eau, le corps humain et le sol lui-même sont conducteurs de l'électricité, tandis que le verre, la résine, l'ébonite, la paraffine, le soufre, la soie, le pétrole, etc., se comportent comme des isolants.

Quant à l'espèce d'électricité, positive ou négative, obtenue par le frottement, elle dépend de la différence de nature qui existe entre les deux corps frottés. On a dressé expérimentalement la liste suivante où les substances sont placées dans un ordre tel que chacune d'elles prend l'électricité positive (vitrée), si elle est frottée par celles qui la suivent dans le tableau, et l'électricité négative (résineuse) lorsqu'elle est frottée par celles qui l'y précèdent.

- | | |
|------------------|------------------|
| 1. Peau de chat | 7. Soie |
| 2. Verre poli | 8. Gomme laque |
| 3. Drap de laine | 9. Résine |
| 4. Plumes | 10. Verre dépoli |
| 5. Bois | 11. Soufre |
| 6. Papier | 12. Métaux. |

Une charge d'électricité existant à la surface d'un bâton de cuivre isolé, *s'écoule* dans le sol lorsqu'à un moment donné, on touche le bâton avec la main. On dit alors qu'un *courant* d'électricité s'est établi entre le bâton et le sol par l'intermédiaire du corps humain ; cela suppose que ce dernier est lui-même en contact avec le sol.

On constate ainsi que l'électricité est tantôt en *repos*, tantôt en *mouvement* par rapport aux corps matériels qui lui servent de supports. De là les noms d'électricité *statique* et d'électricité *dynamique*. Les effets différents que produit l'électricité, selon qu'elle est à l'état de repos (*charge*) ou de mouvement (*courant*), ont fait admettre autrefois qu'il y avait, entre l'électricité statique et l'électricité

dynamique, une différence de nature. On sait aujourd'hui que tel n'est point le cas ; si les effets de l'une ne sont pas les mêmes que ceux de l'autre, cela tient au degré plus ou moins élevé de *tension* ou de



Fig. 1

potentiel ou encore de *niveau électrique*, auquel elles se trouvent.¹

Quand deux corps électrisés (deux sphères métalliques S et S_1

par exemple, fig. 1) sont mis en communication par un fil conducteur ab , il y a passage de l'électricité d'un corps sur l'autre, parce que ceux-ci tendent à mettre leurs charges en équilibre. Le fil ab est alors parcouru par un *courant* qui va du corps S chargé au plus haut potentiel, au corps S_1 , chargé à un potentiel moins élevé. Il se produit ici un phénomène analogue à celui qui a lieu lorsque deux vases V et V_1 ,

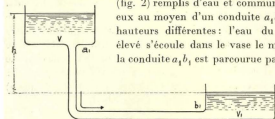


Fig. 2

(fig. 2) remplis d'eau et communiquant entre eux au moyen d'un conduit a_1b_1 , sont à des hauteurs différentes : l'eau du vase le plus élevé s'écoule dans le vase le moins élevé et la conduite a_1b_1 est parcourue par un courant

hydraulique qui va de V vers V_1 .

Dans le cas de la figure 2, la

force qui met en mouvement l'eau, liquide matériel, est la pesanteur ; cette force produit en V_1 une pression qui est d'autant plus

¹ Le fait de l'existence simultanée de deux électricités, l'une dite positive, l'autre dite négative, jouissant de propriétés différentes est, du point de vue de la science actuelle, beaucoup plus important que la distinction que l'on faisait naguère entre l'électricité statique et l'électricité dynamique. Il semble, en effet, résulter de la théorie moderne des ions, électrons et corpuscules, qu'il y a, entre les phénomènes électriques et la structure même de la matière, des relations telles que « chaque atome nous apparaît comme une sorte de système solaire, où de petits électrons négatifs, jouant le rôle de planètes, gravitent autour d'un gros « électron positif qui joue le rôle de soleil central. C'est l'attraction mutuelle de ces électricités de nom contraire qui maintient la cohésion du système et qui en fait « un tout ; c'est elle qui règle les périodes des planètes, et ce sont ces périodes qui « déterminent la longueur d'onde de la lumière émise par l'atome. Outre ces électrons captifs, il y a des électrons libres, qui obéissent aux mêmes lois cinétiques « que les molécules gazeuses et rendent les métaux conducteurs. Ceux-là sont comparables aux comètes qui circulent d'un système stellaire à l'autre et établissent « entre eux comme un libre échange d'énergie. » (Henri POINCARÉ, *Dernières pensées*.)

forte que la différence de niveau h (mesurée en mètres, par exemple), est elle-même plus considérable.

Dans le cas de la figure 1, la force qui pousse le fluide électrique de S vers S_1 , s'appelle *force électromotrice* ; elle est d'autant plus grande que la différence de niveau électrique ou de potentiel qui existe entre S et S_1 , est elle-même plus grande ; on la mesure en *volts*.

Autre analogie : de même que le mouvement de l'eau dans l'intérieur du tuyau a_1b_1 de la figure 2 ne peut avoir lieu sans qu'il y ait *frottement* de cette eau contre les parois intérieures plus ou moins lisses ou plus ou moins spacieuses de a_1b_1 , de même l'écoulement du fluide électrique dans le fil ab de la figure 1 donne naissance à une *résistance* que l'on peut assimiler à un frottement de ce fluide contre les molécules matérielles constituant le fil. Dans les deux cas, cette résistance de frottement ne peut être vaincue qu'aux dépens de tout ou partie de la force qui produit le courant ; elle prend, en électricité, le nom de *résistance électrique* et se mesure en *ohms*.

Il résulte évidemment de ce qui précède que pour calculer ou mesurer l'intensité du courant d'eau ou d'électricité qui s'écoule par a_1b_1 (respectivement par ab), il faut tenir compte, non seulement de la force qui meut le liquide ou le fluide, mais encore de la résistance qui s'oppose à cette force. On arrive ainsi à formuler comme suit l'une des lois fondamentales de l'électricité, la *loi d'Ohm* :

L'intensité du courant électrique qui passe par un conducteur donné, est proportionnelle au nombre de *volts* qui correspondent à la différence de potentiel existant aux extrémités de ce conducteur, et inversement proportionnelle au nombre des *ohms* qui mesurent la résistance de ce même conducteur.

La loi d'Ohm s'écrit :

$$\text{Intensité} = \frac{\text{Force électromotrice}}{\text{Résistance}}$$

ou en abrégé : $I = \frac{E}{R}$ d'où l'on tire successivement $E = RI$ et $R = \frac{E}{I}$.

Cette intensité se mesure pratiquement en *ampères* ; elle est, dans le système électrique, l'analogue du *débit* dans le système hydraulique. L'ampère, unité d'intensité de courant électrique, correspond donc au *litre-seconde*, unité de débit hydraulique.

Enfin le *litre*, qui est lui-même l'unité de quantité d'eau, a pour analogue l'unité de *quantité d'électricité* qui s'appelle le *coulomb* et alors on dit qu'une conduite électrique qui laisse passer en une seconde, unité de *temps*, 6 coulombs par exemple, est parcourue par un cou-

rant qui a une intensité de 6 ampères, absolument comme on dit qu'une conduite hydraulique qui laisse passer 6 litres en une seconde, a un débit de 6 litres-seconde.

La loi qui donne la quantité d'électricité Q en fonction de l'intensité I et du temps T a été découverte par Faraday et s'écrit :

$$Q = IT.$$

Aux quatre notions, acquises ci-dessus, de force électromotrice, de résistance électrique, d'intensité de courant et de quantité d'élec-

tricité, il convient d'ajouter encore ici celle de *travail mécanique* qui existe aussi bien en électricité qu'en hydraulique. De même que l'eau

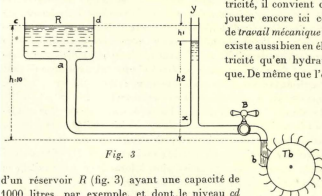


Fig. 3

d'un réservoir R (fig. 3) ayant une capacité de 1000 litres, par exemple, et dont le niveau cd est situé à une hauteur h de 10 mètres, si l'on veut, au-dessus de l'extrémité inférieure b de la conduite ab , peut mettre en mouvement une turbine Tb , lorsqu'on ouvre le robinet B et créer ainsi du travail mécanique utilisable qui est proportionnel au produit des deux facteurs : force de pression de l'eau mesurée en mètres et quantité d'eau mesurée en litres, soit, dans notre cas :

$$10 \text{ mètres} \times 1000 \text{ litres} = 10\,000 \text{ kilogrammètres}$$

puisque un litre d'eau pèse précisément 1 kilogramme, — de même, en multipliant les volts (force de pression électrique) par les coulombs (quantité d'électricité), on obtient le travail mécanique contenu dans un courant électrique, et l'on a la formule de *Joule* :

Travail mécanique = force électromotrice multipliée par quantité d'électricité

ou en abrégé :

$$W = EQ.$$

Toutefois, dans le système coordonné des unités électriques, que nous apprendrons à connaître plus en détail au Chapitre II, le travail

mécanique ainsi obtenu par le produit des volts et des coulombs, est donné non pas en kilogrammètres, mais bien en joules. L'unité de travail mécanique appelée *joule* est environ dix fois plus petite que le kilogrammètre (p. 39 et 43).

Le réservoir de notre figure 3 qui, selon notre supposition, a une capacité de 1000 litres et est situé à une hauteur de 10 mètres au-dessus de la turbine *Tb*, contient un travail mécanique *brut* de 10 000 kilogrammètres (environ 100 000 joules). Pourquoi introduisons-nous ici le mot « brut » ? C'est ce que nous allons rapidement expliquer.

Les 10 000 kilogrammètres n'existent dans leur totalité que pendant que la turbine *Tb* est encore au repos, c'est-à-dire lorsque le robinet *B* est *fermé*. Car aussitôt que *B* est *ouvert* et que l'eau s'écoule, celle-ci frotte contre les parois de la conduite *ab* et donne ainsi naissance à une résistance qui absorbe une certaine portion de la force de pression représentée par la différence de niveau $h = 10$ m. Appelons h_1 cette portion de h et, pour en déterminer expérimentalement la valeur, branchons sur la conduite *ab* en un point x aussi rapproché que possible du robinet *B*, un tube vertical en verre *xy* ; on fait alors les constatations suivantes :

Quand le robinet *B* est fermé, le niveau de l'eau dans le tube *xy* est exactement le même que le niveau *cd* dans le réservoir *R*, en vertu de la loi des vases communicants.

Par contre, dès que le robinet *B* est ouvert et que par conséquent l'eau s'écoule et actionne la turbine *Tb*, le niveau du liquide dans le tube *xy* baisse d'une certaine quantité h_1 , qui est précisément celle dont nous cherchons la valeur et à laquelle est donné, en hydraulique, le nom de *perte de charge*.

Or, cette valeur dépend évidemment : 1° de l'état plus ou moins lisse des parois de la conduite *ab* et 2° de la quantité d'eau que celle-ci débite par seconde, car plus ce débit est grand, plus sont grandes aussi et la vitesse de l'eau et la résistance de frottement ou perte de charge h_1 .

En effet, si après avoir entièrement ouvert le robinet *B*, on le referme lentement, en passant peu à peu par tous les degrés intermédiaires d'ouverture partielle, on constate que le niveau de l'eau dans le tube *xy* remonte lui-même lentement pour arriver de nouveau, lorsque *B* est totalement fermé, au niveau *cd* de l'eau dans le réservoir *R*.

Ainsi donc, au robinet *B* complètement fermé correspond une

valeur de pression de l'eau en x qui est égale à la différence totale h existant entre cd et b ; au robinet B complètement ouvert correspond une autre valeur de pression en x qui est égale à $h - h_1 = h_2$.

Admettons que dans le cas de la figure 3, nous ayons trouvé expérimentalement que pour B ouvert la perte de charge h_1 est de 2 mètres, on aura :

$$h_2 = h - h_1 = 10 \text{ m.} - 2 \text{ m.} = 8 \text{ mètres}$$

et alors notre travail mécanique brut de tout à l'heure est devenu un travail *net* ou effectif de :

$$1000 \text{ litres} \times 8 \text{ mètres} = 8000 \text{ kilogrammètres.}$$

Le rapport $\frac{8000}{10\,000}$ du travail mécanique *net* au travail mécanique *brut*, ou comme on dit souvent, au travail mécanique à l'état *potentiel* (virtuel), est ce qu'on appelle le *rendement* de la conduite hydraulique ab . Il serait ici de 0,80 ou de 80 %.

Dans une conduite électrique a_1b_1 (fig. 4), de résistance r quelconque, parcourue par un courant d'intensité I quelconque, existe aussi, cela va de soi, une *perte de charge électrique*. Celle-ci dépend (comme dans le système hydraulique)

de la résistance r de a_1b_1 et de l'intensité I du courant et n'est autre chose que la différence de pression, évaluée en volts, qui existe entre les deux points a_1b_1 ; autrement dit, elle est la portion e de la force électromotrice E de I , qui est employée à vaincre la résistance r de a_1b_1 , et l'on peut écrire :

$$e \text{ volts} = r \text{ ohms} \times I \text{ ampères.}$$

Cette expression n'est elle-même autre chose que la formule d'Ohm ($I = \frac{E}{R}$) adaptée au cas de la figure 4.

Ce que nous venons d'exposer au sujet du travail mécanique brut et net et du rendement d'une installation ou portion d'installation hydraulique, s'applique, par analogie, à une installation ou portion d'installation électrique.

D'une manière générale, tout appareil matériel producteur ou réservoir de force, toute conduite de transport, toute machine d'utilisation, etc., par lesquels passe une substance matérielle en mouvement (solide, liquide, gazeuse) ou un fluide immatériel à l'état de courant (électricité, chaleur, etc.), donne naissance à une résistance ;

celle-ci absorbe une portion plus ou moins grande de la force disponible à l'entrée de l'appareil (ou de la conduite, ou de la machine), en sorte que la force encore disponible à la sortie est toujours inférieure à la force absorbée à l'entrée ; en d'autres termes, le rendement de n'importe quel appareil naturel ou fait de main d'homme, est toujours *plus petit que l'unité* ; de là l'impossibilité du mouvement perpétuel.

Une installation quelconque (hydraulique, électrique, thermique, etc.), comporte une *série* d'appareils dont chacun a son propre rendement. Le rendement général de l'installation s'obtient en multipliant les uns par les autres les rendements partiels (considérés individuellement). Ainsi dans l'installation hydraulique de la figure 3, si l'on suppose que les rendements individuels du réservoir *R*, de la conduite *ab* (seule sans le réservoir), de la turbine *Tb* seule, soient respectivement de 0,94, 0,85, et 0,75, on aurait comme rendement de l'installation compté depuis le niveau *cd* de *R* jusqu'à l'axe de la turbine *Tb* :

$$0,94 \times 0,85 \times 0,75 = 0,60 \text{ en chiffre rond ou } 60 \%$$

et alors il ne reste disponible à l'axe de la turbine *Tb* pour mettre en mouvement les machines que celle-ci doit commander, qu'un travail mécanique net de :

$$10\,000 \times 0,60 = 6000 \text{ kilogrammètres.}$$

Si l'on voulait calculer le rendement de l'installation d'une manière plus complète encore, en tenant compte, par exemple, de toutes les machines plus ou moins nombreuses ou à plus ou moins bon rendement, que met en mouvement l'axe de la turbine *Tb*, on arriverait, cela va de soi, à un rendement général inférieur à celui de 0,60 obtenu ci-dessus ; et ainsi de suite pour tous les autres points importants de la *série*.

Toute installation de production, de transport et d'utilisation de force, constitue un *cycle fermé* partant du générateur (ou réservoir) de force, pour y revenir. Lorsque ce générateur est électrique (machine à frottement, pile hydro ou thermo-électrique, dynamo, etc.), le cycle se ferme, au retour, à travers le générateur même, en passant intérieurement de la borne de rentrée à la borne de sortie.¹

¹ Le cycle ou circuit existe aussi pour l'installation hydraulique de la figure 3, mais alors il est fermé gratuitement par la force des rayons solaires qui fait remonter, sous forme de nuages, l'eau sortie de la turbine *Tb*, jusqu'à un niveau supérieur à celui *cd* du réservoir *R*. Transportée là, cette eau se condense et peut s'écouler (après captation et canalisation), sous l'action de la pesanteur, dans le réservoir *R*.

On constate d'ailleurs que le travail mécanique brut, tel que nous l'avons défini tout à l'heure, n'existe en sa totalité que lorsque la force qui, une fois déclanchée, le créera, est encore à l'état potentiel, c'est-à-dire à l'état de repos ou de charge.

D'autre part, il faut distinguer ici entre un réservoir (ou générateur) de force, dont la charge, limitée à une contenance, à une *capacité* donnée, est épuisée lorsque tout le travail mécanique correspondant a été dépensé, — et un même réservoir où, au contraire, la charge en fluide matériel ou immatériel, se renouvelle au fur et à mesure de cette dépense. Dans le premier cas, le courant d'utilisation de la force est lui-même limité en durée, et cette durée est parfois tellement courte, malgré une capacité relativement grande du réservoir, que celui-ci se vide presque instantanément ; c'est ce qui arrive notamment en électricité, lorsqu'on relie les deux armatures d'un condensateur (ch. V) ; le courant prend alors le nom de *décharge*. Dans le second cas, le courant d'utilisation arrive à un état dit *permanent* ; c'est celui que fournit, par exemple, une pile hydro-électrique travaillant sur un circuit extérieur fermé ; l'activité que cette pile déploie et le travail mécanique qu'elle crée, durent aussi longtemps que les matières (plaques métalliques et acide) qui constituent le couple voltaïque (p. 25) sont elles-mêmes en état de fonctionner.

Des considérations qui précèdent découlent les notions de deux nouvelles grandeurs, celle de *capacité* et celle de *puissance* :

1^o De même qu'un gaz, par exemple, peut être emmagasiné dans un réservoir proportionnellement d'une part à la capacité de ce dernier, et d'autre part à la pression du gaz, de même l'électricité peut être accumulée sur un conducteur de telle façon que l'on peut écrire :

$$\text{Quantité} = \text{Force électromotrice} \times \text{capacité}$$

ou en abrégé :
$$Q = E \times C.$$

L'unité pratique de capacité électrique est le *farad*. C'est la capacité d'un conducteur qui, chargé au potentiel d'1 volt, contient une quantité d'électricité égale à 1 coulomb :

$$Q \text{ coulombs} = E \text{ volts} \times C \text{ farads.}$$

De $Q = E \times C$ on tire respectivement :

$$E = \frac{Q}{C} \text{ et } C = \frac{Q}{E}$$

(voir au chapitre V ce qui concerne les capacités et les condensateurs).

2^o La *puissance* d'un courant (et aussi celle de n'importe quelle

machine ou installation en activité) est, par définition, le travail mécanique que ce courant (ou cette machine) fournit pendant l'unité de temps (la seconde) ; on peut donc écrire :

$$\text{Puissance} = \frac{\text{Travail mécanique}}{\text{Temps}}$$

ou en abrégé :

$$P = \frac{W}{T}$$

Mais d'autre part, nous savons (p. 20) que :

$$W \text{ joules} = E \text{ volts} \times Q \text{ coulombs et que :}$$

$$Q \text{ coulombs} = I \text{ ampères} \times T \text{ secondes ;}$$

on peut donc écrire en remplaçant W et Q par leurs valeurs :

$$P = \frac{E \times I \times T}{T} = E \times I = EI.$$

L'unité pratique de puissance est le *watt*, qu'on appelle aussi le *joule-seconde*.

La puissance en watts d'un courant n'est donc autre chose que le produit des volts par les ampères de ce courant.¹

Pile de Volta. — Le générateur d'électricité à débit permanent qui se prête le mieux à l'application des différentes formules que nous venons d'apprendre à connaître sommairement, est la *pile*, nom qui vient de la disposition que le célèbre Volta, son inventeur, avait primitivement donnée à cet appareil.

Un couple voltaïque (fig. 5) consiste en deux plaques conductrices, l'une de zinc Zn , l'autre de cuivre Cu , plongées dans un liquide (eau acidulée) qui a une plus grande action chimique sur le zinc que sur le cuivre. Cette différence de réaction a pour effet de développer, aux extrémités supérieures des plaques, deux charges d'élec-

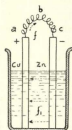


Fig. 5

¹ Dans les cas où le courant se présente sous la forme d'une *décharge* (condensateur industriel à grande capacité, nuages échangeant leurs électricités de noms contraires à 15 ou 20 kilomètres de distance, etc.), la puissance en jeu peut atteindre des valeurs énormes, d'abord parce que E est lui-même très grand et ensuite parce que le temps T de décharge est extrêmement petit : un travail mécanique de 736 joules = 75 kilogrammètres, effectué en une seconde, équivaut à un cheval-vapeur (p. 43) ; mais si ce même travail est dépensé sous la forme d'une décharge dont la durée n'est que de un cent-millième de seconde, il représente une puissance de $\frac{736 \text{ joules}}{0,00001 \text{ sec.}} = \text{cent mille chevaux-vapeur.}$

On constate d'ailleurs que le travail mécanique brut, tel que nous l'avons défini tout à l'heure, n'existe en sa totalité que lorsque la force qui, une fois déclanchée, le créera, est encore à l'état potentiel, c'est-à-dire à l'état de repos ou de charge.

D'autre part, il faut distinguer ici entre un réservoir (ou générateur) de force, dont la charge, limitée à une contenance, à une *capacité* donnée, est épuisée lorsque tout le travail mécanique correspondant a été dépensé, — et un même réservoir où, au contraire, la charge en fluide matériel ou immatériel, se renouvelle au fur et à mesure de cette dépense. Dans le premier cas, le courant d'utilisation de la force est lui-même limité en durée, et cette durée est parfois tellement courte, malgré une capacité relativement grande du réservoir, que celui-ci se vide presque instantanément ; c'est ce qui arrive notamment en électricité, lorsqu'on relie les deux armatures d'un condensateur (ch. V) ; le courant prend alors le nom de *décharge*. Dans le second cas, le courant d'utilisation arrive à un état dit *permanent* ; c'est celui que fournit, par exemple, une pile hydro-électrique travaillant sur un circuit extérieur fermé ; l'activité que cette pile déploie et le travail mécanique qu'elle crée, durent aussi longtemps que les matières (plaques métalliques et acide) qui constituent le couple voltaïque (p. 25) sont elles-mêmes en état de fonctionner.

Des considérations qui précèdent découlent les notions de deux nouvelles grandeurs, celle de *capacité* et celle de *puissance* :

1^o De même qu'un gaz, par exemple, peut être emmagasiné dans un réservoir proportionnellement d'une part à la capacité de ce dernier, et d'autre part à la pression du gaz, de même l'électricité peut être accumulée sur un conducteur de telle façon que l'on peut écrire :

$$\text{Quantité} = \text{Force électromotrice} \times \text{capacité}$$

$$\text{ou en abrégé : } Q = E \times C.$$

L'unité pratique de capacité électrique est le *farad*. C'est la capacité d'un conducteur qui, chargé au potentiel d'1 volt, contient une quantité d'électricité égale à 1 coulomb :

$$Q \text{ coulombs} = E \text{ volts} \times C \text{ farads.}$$

De $Q = E \times C$ on tire respectivement :

$$E = \frac{Q}{C} \text{ et } C = \frac{Q}{E}$$

(voir au chapitre V ce qui concerne les capacités et les condensateurs).

2^o La *puissance* d'un courant (et aussi celle de n'importe quelle

machine ou installation en activité) est, par définition, le travail mécanique que ce courant (ou cette machine) fournit pendant l'unité de temps (la seconde) ; on peut donc écrire :

$$\text{Puissance} = \frac{\text{Travail mécanique}}{\text{Temps}}$$

ou en abrégé :

$$P = \frac{W}{T}$$

Mais d'autre part, nous savons (p. 20) que :

$$W \text{ joules} = E \text{ volts} \times Q \text{ coulombs et que :}$$

$$Q \text{ coulombs} = I \text{ ampères} \times T \text{ secondes ;}$$

on peut donc écrire en remplaçant W et Q par leurs valeurs :

$$P = \frac{E \times I \times T}{T} = E \times I = EI.$$

L'unité pratique de puissance est le *watt*, qu'on appelle aussi le *joule-seconde*.

La puissance en watts d'un courant n'est donc autre chose que le produit des volts par les ampères de ce courant.¹

Pile de Volta. — Le générateur d'électricité à débit permanent qui se prête le mieux à l'application des différentes formules que nous venons d'apprendre à connaître sommairement, est la *pile*, nom qui vient de la disposition que le célèbre Volta, son inventeur, avait primitivement donnée à cet appareil.

Un couple voltaïque (fig. 5) consiste en deux plaques conductrices, l'une de zinc Zn , l'autre de cuivre Cu , plongées dans un liquide (eau acidulée) qui a une plus grande action chimique sur le zinc que sur le cuivre. Cette différence de réaction a pour effet de développer, aux extrémités supérieures des plaques, deux charges d'élec-

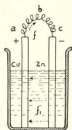


Fig. 5

¹ Dans les cas où le courant se présente sous la forme d'une *décharge* (condensateur industriel à grande capacité, nuages échangeant leurs électricités de noms contraires à 15 ou 20 kilomètres de distance, etc.), la puissance en jeu peut atteindre des valeurs énormes, d'abord parce que E est lui-même très grand et ensuite parce que le temps T de décharge est extrêmement petit : un travail mécanique de 736 joules = 75 kilogrammètres, effectué en une seconde, équivaut à un cheval-vapeur (p. 43) ; mais si ce même travail est dépensé sous la forme d'une décharge dont la durée n'est que de un cent-millième de seconde, il représente une puissance de $\frac{736 \text{ joules}}{0,00001 \text{ sec.}} = \text{cent mille chevaux-vapeur,}$

tricité de nom contraire, l'une positive sur le cuivre, l'autre négative sur le zinc. Si donc on relie par un fil métallique abc le pôle positif cuivre au pôle négatif zinc, il s'établit dans abc un courant qui va du corps qui a la charge électrique la plus élevée en potentiel, vers celui qui a la charge la moins élevée. Ce sens de circulation est indiqué par la flèche f dans le fil abc (circuit extérieur) et par les flèches f_1 dans la tranche de liquide acidulé qui sépare les deux plaques (circuit intérieur). Ce sens dépend de la différence de nature des plaques ; c'est toujours celle des deux qui est la plus attaquée chimiquement par le liquide, qui constitue le pôle négatif. Deux plaques de nature identique, toutes deux de zinc par exemple, seraient attaquées également par l'eau acidulée et donneraient naissance à deux courants égaux, mais de sens contraires, qui s'annuleraient réciproquement.

D'autre part, on pourrait, à la rigueur, supprimer la plaque la moins attaquée (ici Cu), en plongeant directement dans le liquide l'extrémité a du fil conducteur abc (qui est généralement en cuivre) ; il existerait alors, entre c et a , la même différence de potentiel qu'entre c et Cu de la figure 5 ; par contre l'intensité du courant ainsi produit serait plus faible que si Cu , conducteur à plus grande section et par conséquent à plus faible résistance que le simple bout de fil a , existait. En fait le rôle utile de la plaque Cu est de recueillir, de collecter l'électricité positive répandue dans la masse du liquide.

La différence de potentiel qui existe entre les deux pôles d'un couple voltaïque est d'autant plus grande que la différence des actions chimiques exercées par le liquide sur les deux plaques est elle-même plus considérable. La nature des plaques choisies pour constituer un couple, non-identique au couple cuivre-zinc de Volta, a donc son importance.

Les substances qui, plongées dans l'acide sulfurique ou l'acide nitrique étendus d'eau, donnent aux bornes d'un élément de pile le voltage le plus élevé, sont celles qui, dans le tableau suivant, sont le plus éloignées l'une de l'autre :

Soufre, charbon, platine, or, argent, cuivre, fer, plomb, étain, zinc, hydrogène, aluminium.

On obtient d'ailleurs, cela va de soi, l'effet électrique maximum, lorsque le liquide dont on se sert est sans action chimique sur la plaque positive. Tel est le cas du charbon et notamment du charbon des cornues à gaz, qui joint à la qualité d'être inattaquable par tous les liquides des piles, celle du bas prix de revient.

Quant à la plaque négative, elle est constituée dans la plupart des piles usuelles, par du zinc qui est de tous les métaux relativement bon marché, le plus énergiquement attaqué et qui donne par conséquent, accouplé au charbon, la plus grande force électromotrice. Le zinc plus ou moins impur du commerce a l'inconvénient de se consommer, même à *circuit ouvert*, c'est-à-dire lorsque le circuit extérieur *abc* de la figure 5 n'est pas fermé, autrement dit, pas utilisé. Pour éviter cette dépense inopportune et inutilement coûteuse, on *amalgame* la plaque de zinc, opération qui consiste à frotter ses surfaces avec une brosse dure dans un récipient contenant du mercure et de l'acide sulfurique dilué dans de l'eau.

La valeur pratique d'un élément de pile ne dépend pas seulement de la force électromotrice produite par la réaction chimique du liquide sur les plaques, mais aussi de sa *résistance intérieure*. On appelle ainsi la partie de la résistance électrique du circuit total (*abc—Zn— f_1 —Cu* de la fig. 5) qui est constituée par les plaques et par la tranche de liquide existant entre elles deux ; cette portion de la résistance est l'analogie de celle qu'éprouve l'eau en frottant contre les parois du réservoir de notre figure 3. Or, il est bien évident que plus cette tranche est épaisse, c'est-à-dire plus les deux plaques sont éloignées l'une de l'autre, plus la longueur du chemin parcouru par le fluide électrique dans le sens des flèches f_1 , est grande, plus aussi est grande la résistance intérieure du couple. Il est tout aussi évident en outre que plus cette même tranche est grande en surface de section, c'est-à-dire dans le sens perpendiculaire à la direction des flèches f_1 , plus aussi le chemin, ainsi offert au fluide, est large, moins est grande la résistance intérieure du couple. Enfin il est non moins évident que de deux liquides donnés, celui qui conduit le mieux le fluide électrique, opposera, toutes autres choses (épaisseur et section de la tranche du liquide) égales d'ailleurs, moins de résistance que l'autre.

Les trois facteurs influençant la résistance intérieure r d'un générateur hydro-électrique quelconque sont, tels que nous venons de les caractériser, liés à cette résistance par la formule :

$$r = a \frac{L}{s}$$

dans laquelle L est la longueur du chemin parcouru par le fluide entre les plaques parallèlement à la direction de propagation, s la section de ce chemin perpendiculairement à cette même direction et

enfin a un coefficient dit de *résistance spécifique* qui dépend de la nature du liquide employé.¹

La résistance intérieure une fois connue, on en déduit la perte de charge correspondante au moyen de la formule d'Ohm mise sous la forme $e = rI$ (p. 22).

Désignons d'autre part par E la force électromotrice *totale* produite par la réaction chimique du liquide sur les plaques, autrement dit la différence de potentiel qui existe entre les bornes de l'élément, lorsque celles-ci ne sont pas encore reliées entre elles par le circuit extérieur abc de la figure 5 ; on aura évidemment comme force électromotrice E_1 existant à ces mêmes bornes lorsque le circuit extérieur abc sera fermé et produira du travail mécanique :

$$E_1 = E - e = E - rI$$

ce qui signifie que la force électromotrice qui existe aux bornes d'un élément voltaïque en activité est égale à la différence de potentiel qui existe entre ces mêmes bornes à circuit ouvert, moins la perte de charge provoquée à l'intérieur de la pile par la circulation du courant I .

Mais I lui-même est égal à $\frac{E}{R}$, R étant la résistance du circuit total (intérieur et extérieur).

On voit ainsi que la force électromotrice disponible aux bornes d'un générateur hydro-électrique actif est d'autant plus grande que l'intensité I du courant et la résistance intérieure r de l'élément sont plus faibles.

A circuit ouvert, où I est nul, la pile possède sa force électromotrice maximum (comparer avec p. 21 et suivantes).

La puissance d'un courant étant égale, comme nous le savons, au produit de la force électromotrice par l'intensité, on aura :

$$\text{Puissance utile} = E_1 \times I$$

$$\text{Puissance totale} = E \times I.$$

Le rendement d'une pile peut donc être exprimé par l'équation :

$$\frac{P_u}{P_t} = \frac{E_1 I}{E I} = \frac{E_1}{E}.$$

Différents groupements des éléments de pile. — Dans ce qui précède, nous avons provisoirement admis que le générateur hydro-électrique en cause ne consistait qu'en un seul et unique élément ou

¹ On néglige ici la résistance des plaques proprement dites qui est très petite par rapport à celle du liquide.

couple voltaïque tel que celui de la figure 5. Mais on comprend facilement que si l'intensité I du courant ainsi obtenu est trop faible pour produire dans le circuit extérieur abc l'effet désiré, nous songions à nous servir de plusieurs de ces éléments en les combinant électriquement entre eux de manière à faire varier, dans un sens favorable, les deux facteurs E et R qui, selon la formule d'Ohm, influencent la valeur de I .

Or E et R , nous venons de le constater, se décomposent chacun en deux portions qui concernent l'une, le circuit intérieur du générateur, l'autre le circuit extérieur abc .

Occupons-nous tout d'abord du circuit intérieur et cherchons comment, disposant d'un certain nombre d'éléments de pile identiques, il nous sera possible d'obtenir de leur ensemble un effet plus grand ou plus favorable que celui qu'on obtient avec un seul d'entre eux.

Ici, deux méthodes se trouvent tout d'abord en présence, à savoir l'intercalation des éléments en *tension* ou en *série*, et l'intercalation des éléments en *quantité* ou en *parallèle*.

La première consiste à relier par un fil conducteur le pôle négatif du premier élément avec le pôle positif du second, le pôle négatif du second avec le pôle positif du troisième et ainsi de suite. Le pôle positif du premier élément et le pôle négatif du dernier élément de la série, constituent les deux pôles généraux de la pile (ou, comme on dit souvent, de la *batterie*) auxquels viennent s'attacher respectivement les deux extrémités a et c du fil extérieur abc (fig. 6).

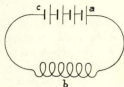


Fig. 6

Dans la seconde méthode, on relie entre eux d'une part les pôles positifs et d'autre part les pôles négatifs de tous les éléments, pour faire de leur réunion les deux pôles généraux de la pile (fig. 7).

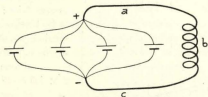


Fig. 7

Dans l'intercalation en tension de la figure 6, on obtient aux pôles généraux d'une pile de n éléments une force électromotrice ne qui est n fois supérieure à celle e d'un seul élément, et une résistance inté-

rieure nr qui est aussi n fois supérieure à celle r d'un seul élément.

Dans l'intercalation en quantité de la figure 7, on a, aux pôles généraux, une force électromotrice e , égale à celle d'un seul élément, et une résistance intérieure $\frac{r}{n}$ qui est n fois plus petite que celle r d'un seul élément.

En effet, dans la première méthode où le courant ne trouve devant lui, en passant de l'un des éléments au suivant, qu'un chemin unique (sans bifurcation), il y a addition, d'une part, des forces électromotrices propres à chacun des n éléments, d'autre part, de leurs n résistances intérieures par allongement successif du chemin à parcourir.

Dans la seconde méthode, au contraire, le chemin que parcourt le

courant est, dans le circuit intérieur de la pile, partagé en autant de branches qu'il y a d'éléments, en sorte que l'effet général reste le même, électriquement parlant, que si l'on mettait, bout à bout, d'un côté toutes les plaques positives, de l'autre toutes les plaques négatives, et que l'on plongeât ces deux plaques n fois plus grandes en surface que celles d'un seul petit élément primitif, dans un seul et même vase agrandi en proportion et contenant n fois plus de liquide qu'un seul des n petits vases.

Entre les deux groupements en série et en quantité pures des figures 6 et 7, il y a place pour des groupements intermédiaires, tenant à la fois de l'un et de l'autre. Avec 8 éléments Leclanché, par exemple, ayant chacun une force électromotrice de 1,5 volt et une

résistance intérieure de 0,7 ohm on pourra faire :

1^o Une seule série de 8 éléments en tension (fig. 8) et alors on aura aux bornes de la pile :

a) une force électromotrice de $8 \times 1,5 = 12$ volts,

b) une résistance intérieure de $8 \times 0,7 = 5,6$ ohms.

2^o Deux séries parallèles de chacune

4 éléments en tension (fig. 9), ce qui correspond à :

a) une force électromotrice de $4 \times 1,5 = 6$ volts,

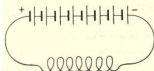


Fig. 8

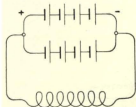


Fig. 9

b) une résistance intérieure de $\frac{4 \times 0,7}{2} = 1,4$ ohm.

3° Quatre séries parallèles de chacune deux éléments en tension (fig. 10), ce qui donne aux pôles généraux de la pile :

a) une force électromotrice de $2 \times 1,5 = 3$ volts,

b) une résistance intérieure de $\frac{2 \times 0,7}{4} = 0,35$ ohm.

4° Huit éléments en quantité (fig. 11), et alors on a :

a) force électromotrice de la pile : 1,5 volt,

b) résistance intérieure de la pile : $\frac{0,7}{8} = 0,0875$ ohm.

D'une manière générale, la force électromotrice d'une pile ou d'une batterie, quel que soit le groupement adopté, est égale au produit de la force électromotrice d'un seul élément par le nombre des éléments reliés en tension dans une seule série, et sa résistance intérieure au produit de la résistance intérieure d'un seul élément par le nombre des éléments reliés en tension dans une seule série, ce dernier produit étant en outre à diviser par le nombre des séries qui sont reliées en parallèle.

Tous ces groupements peuvent être utilement employés ; leur adoption dépend :

a) du voltage qui convient aux appareils d'utilisation intercalés dans le circuit extérieur ;

b) de la manière dont les différentes résistances constituant le circuit extérieur sont disposées.

Circuits simples. — La formule

$$r = a \frac{L}{s}$$

que nous avons donnée à la page 27 pour calculer la résistance du liquide d'un élément de pile, s'applique telle quelle au calcul de n'importe quel conducteur électrique simple dont on connaît la nature (coefficient de résistance spécifique a), la longueur L qu'il a dans la direction de propagation du courant et enfin la section s qu'il offre à ce courant, perpendiculairement à cette direction.

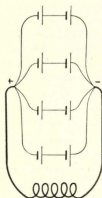


Fig. 10

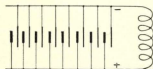


Fig. 11

Le cas qui se présente le plus fréquemment dans la pratique est celui d'un conducteur d'une certaine longueur et à section constante, dont on peut facilement mesurer les dimensions. Lorsque sa longueur L est donnée en mètres et sa section régulière s en millimètres carrés, le coefficient de résistance spécifique a n'est autre chose que la résistance en ohms d'un fil qui, ayant même nature et même température que le conducteur dont on cherche la résistance, a un mètre de longueur et un millimètre carré de section.

Le coefficient a augmente avec l'élévation de la température, lorsque le conducteur considéré est un métal ; il diminue au contraire avec l'élévation de la température, lorsque le corps considéré est un isolant.

Les différents corps n'ont pas la même sensibilité en ce qui concerne l'influence qu'a sur leur résistance électrique spécifique, la variation de la température. Il est donc nécessaire de donner pour chaque corps, à côté de sa résistance spécifique a , son coefficient α de température, c'est-à-dire la quantité dont un ohm du conducteur considéré varie pour une variation de 1 degré centigrade.

Voici quelles sont les valeurs du coefficient a à zéro degré pour le cuivre recuit et écroui et les valeurs correspondantes du coefficient de température α :

Métaux	Coefficient a	Coefficient α
Cuivre recuit	0,0158	0,004
Cuivre écroui	0,0162	0,004

La formule qui permet de calculer la résistance R_n d'un conducteur métallique à une température de n degrés centigrades, lorsqu'on connaît la résistance R_0 qu'il a à zéro degré, est :

$$R_n = R_0 (1 + \alpha n).$$

Exemple d'application des deux formules $R_0 = a \frac{L}{s}$ et

$R_n = R_0 (1 + \alpha n)$: quelle est la résistance d'un fil de cuivre écroui de 600 mètres de longueur et de 0,3 millimètre de diamètre à la température de 60 degrés centigrades ?

$$\text{On a : } R_0 = a \frac{L}{s}.$$

Or s , section du fil, est égale au diamètre d de ce fil élevé au carré, divisé par 4 et multiplié par π

$$s = \pi \frac{d^2}{4} = 3,14 \times \frac{0,09}{4} = 0,0707 \text{ m/m carré.}$$

Par suite :

$$R_0 = a \frac{L}{s} = 0,0162 \times \frac{600}{0,0707} = 137,5 \text{ ohms}$$

$$\text{et } R_{60} = a \frac{L}{s} \{1 + (\alpha \times 60^\circ)\}$$

$$\text{soit } R_{60} = 137,5 \{1 + (0,004 \times 60)\} = 170,5 \text{ ohms.}$$

L'augmentation de résistance du fil considéré due à l'augmentation de température de 0 à 60 degrés est ainsi de :

$$170,5 - 137,5 = 33 \text{ ohms}$$

soit le 24 pour cent de la résistance à 0°.

Un circuit *simple* (sans bifurcation) dans lequel sont mis bout à bout (en série) un certain nombre de conducteurs *ab*, *bc*, *cd*, *de*, ayant chacun sa résistance électrique propre, différente de celle des autres conducteurs (fig. 12), a une résistance totale R_e égale à la somme des résistances partielles $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$ en sorte qu'on peut écrire $R_e = r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + \dots + r_n$.

Comme d'autre part l'intensité I du courant qui circulerait entre *a* et *e* sous l'influence d'une force électromotrice E à travers les résistances successives $r_1, r_2 \dots r_n$ est la même en tous les points du circuit *abcde*, on aura évidemment :

$$I = \frac{E}{r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n}$$

Circuits dérivés. — Par contre, si le circuit considéré, au lieu d'être simple, est double, en ce sens que le courant arrivé au point de bifurcation *a* (fig. 13) est obligé de se diviser en deux parties, on aura en appelant i_1 et i_2 les deux intensités de courant qui circulent, l'une dans la branche *abc*, l'autre dans la branche *ab₁c* :

$$I = i_1 + i_2$$

I étant le courant total mesuré avant le point *a* ou après le point *c*.

Appelons d'autre part r_1 la résistance du fil *abc*, r_2 celle du fil *ab₁c*,

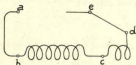


Fig. 12

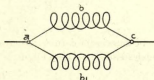


Fig. 13

et e la différence de potentiel (perte de charge) régnant entre les deux points a et c , on aura, en appliquant la formule d'Ohm :

$$e = i_1 \times r_1 = i_2 \times r_2$$

d'où l'on tire :

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_2}{r_1}.$$

Ce qui signifie que les intensités partielles se répartissent en proportion inverse des résistances partielles.

Si $r_1 = r_2$, on a évidemment, comme résistance R de l'ensemble des deux dérivation abc et ab_1c , $R = \frac{r_1}{2}$, car la section du chemin offert au courant entre a et c est double de celle que lui offre chacun des deux chemins partiels.

Par contre, si r_1 est différent de r_2 , on devra appliquer la formule plus générale :

$$R = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}.$$

Celle-ci est juste, car si l'on y fait $r_1 = r_2$, on obtient :

$$R = \frac{r_1^2}{2r_1} = \frac{r_1}{2}$$

et l'on retombe bien dans le cas particulier qui vient d'être traité.

Si l'on a n résistances inégales $r_1 r_2 r_3 \dots r_n$ intercalées en dérivation entre deux points a et b (fig. 14) d'un conducteur principal unique, leur résistance complexe (ou *réduite* comme on dit souvent), sera donnée par la formule la plus générale :

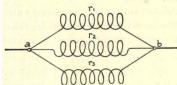


Fig. 14

$$R = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} \dots + \frac{1}{r_n}}.$$

Si dans cette dernière équation on fait les n résistances partielles égales entre elles, on obtient :

$$R = \frac{r_1}{n}.$$

Exemples. — 1. Soient deux dérivation dont l'une $r_1 = 600$ ohms et l'autre $r_2 = 950$ ohms ; on aura :

$$R = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} = \frac{600 \times 950}{600 + 950} = \frac{570\,000}{1\,550} = 368 \text{ ohms.}$$

Si $r_1 = r_2 = 600$ ohms, on a :

$$R = \frac{600^2}{1\,200} = \frac{360\,000}{1\,200} = 300 \text{ ohms} = \frac{r_1}{2}.$$

2. Soient 3 dérivationes dont les résistances sont respectivement : 1, 4 et 5 ohms, on aura :

$$R = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5}} = 0,689 \text{ ohm.}$$

Dans le tableau ci-dessous, nous donnons les résistances électriques à zéro degré des métaux et alliages usuels, rapportées à un fil de un mètre de long et de un millimètre de diamètre (ou de 0,785 millimètre carré de section), et les coefficients de température (accroissements de résistance par degré centigrade) correspondants (voir aussi p. 32).

Métaux ou Alliages	Résistance à 0° d'un fil de 1 m. de long et de 1 mm. de diamètre	Coefficient de température soit augmentation de résistance par degré centigrade
	Ohms	Ohms
Argent recuit.	0,01899	0,00377
Argent écoui.	0,02062	0,00377
Cuivre recuit.	0,02017	0,00388
Cuivre écoui.	0,02063	0,00388
Or recuit.	0,02598	0,00365
Or écoui.	0,02645	0,00365
Aluminium recuit.	0,03679	0,0039
Zinc comprimé.	0,07105	0,00365
Platine recuit.	0,1144	0,00247
Fer recuit.	0,1227	0,00630
Nickel recuit.	0,1573	
Étain comprimé.	0,1668	0,00365
Plomb comprimé.	0,2478	0,00387
Mercure liquide.	1,2010	0,00072
Maillechort.	0,2643	0,00044

Mesure des grandeurs.

Généralités. — Un phénomène quelconque ne peut être considéré comme scientifiquement connu que si l'on peut lui appliquer le calcul, autrement dit que si l'on peut *mesurer* les divers éléments qui le constituent ou le caractérisent.

Il faut en conséquence :

1^o Avoir, pour chaque grandeur à mesurer, une *unité* commode et universellement adoptée.

2^o Connaître les relations qui lient mathématiquement entre elles les différentes grandeurs.

3^o Disposer d'instruments et de méthodes assurant aussi exactement et aussi rapidement que possible, les opérations de mesure.

Un système de mesures est l'ensemble des unités auxquelles on compare chacune des grandeurs à mesurer.

Un tel système est dit *irrationnel* lorsque les unités qui le composent ont été toutes ou presque toutes choisies *arbitrairement* et ne présentent entre elles aucun rapport mathématique simple.

Tel était le cas des unités que l'on employait avant l'institution du système métrique pour évaluer les longueurs (pied, toise, aune, etc.), les poids (livre, once, etc.), les capacités (boisseau, gallon, pinte, etc.), les monnaies (livre, écu, mark, sou, etc.), etc. Leur incommodité était encore augmentée du fait qu'elles n'étaient en usage que sur de petites portions de territoires et cessaient d'être valables en dehors de certaines frontières elles-mêmes peu précises.

Le système métrique est, au contraire, un système *rationnel* de mesures, parce qu'il est basé tout entier sur une seule unité arbitraire, le mètre, qui est fondamentale et avec laquelle toutes les autres unités (d'étendue, de poids, de capacité, de monnaie, etc.), sont dans un rapport simple et par conséquent commode.

Toutefois l'énorme développement qu'ont pris, dès le commencement du XIX^e siècle, la science électrique et plus tard ses innombrables

applications, a obligé les savants à compléter et, jusqu'à un certain degré, à modifier le système métrique de telle manière que les grandeurs nouvelles dont les physiciens et les techniciens (mécaniciens, électriciens, etc.) ont continuellement à s'occuper, puissent également trouver place dans un ensemble cohérent d'unités perfectionnées.

Ainsi prit naissance le système moderne des unités absolues *centimètre, gramme, seconde* (en abrégé *C. G. S.*) dont nous allons faire l'exposé et dont font d'ailleurs partie les unités volt, ohm, ampère, joule, watt et farad, que nous avons déjà appris à connaître dans le chapitre précédent.

1^o Exposé du système C. G. S.

Unités fondamentales. — Ce sont :

Le centimètre pour les longueurs L ;

Le gramme-masse pour les masses matérielles M ;

La seconde sexagésimale de temps moyen pour les temps T .

Ces trois unités, qui sont appelées fondamentales et qu'on pourrait considérer comme un pont jeté entre le domaine de la science proprement dite et celui de la métaphysique (espace, matière, temps), ont été choisies *arbitrairement* en ce sens qu'il eût été loisible de leur préférer d'autres unités de même espèce, par exemple, le mètre, le kilogramme-masse, la seconde décimale de temps moyen, si l'on avait constaté, après discussion, que cette préférence aurait présenté un ou plusieurs avantages importants sur le système C. G. S., ce qui n'a pas été, semble-t-il, le cas.

Nous rappelons ici, à propos de l'unité gramme-masse, qu'il faut se garder de la confondre avec l'unité gramme-poids. Le gramme-masse représente une quantité de matière dont la valeur est indépendante du point de la surface terrestre où elle se trouve, tandis que la valeur du gramme-poids varie selon qu'il est considéré près des pôles ou de l'équateur. On sait, en effet, que le poids d'un corps donné varie avec la latitude et avec l'altitude, l'intensité de la pesanteur étant plus grande aux pôles qu'à l'équateur et aussi un peu plus grande au niveau de la mer que sur une montagne. Les causes de ces variations sont, d'une part, la force centrifuge due à la rotation diurne de la terre autour de son axe polaire et, d'autre part, la distance légèrement plus grande (ou plus faible) à laquelle la masse matérielle considérée se trouve par rapport au centre d'attraction de la sphère terrestre.

Les masses des différents corps sont, à volumes égaux, proportionnelles aux *densités* de ces corps.

Rappelons enfin que la masse matérielle d'un corps n'est autre chose que le quotient d'une force quelconque agissant sur elle, par l'accélération que cette force lui communique (augmentation de sa vitesse par seconde), en sorte qu'on peut écrire :

$$M = \frac{F}{f} = \frac{F'}{f'} = \frac{F''}{f''} \dots = \frac{P}{g},$$

F , F' , F'' , etc., étant des forces différentes produisant des accélérations f , f' , f'' , etc., et P la force de la pesanteur produisant l'accélération g (g est au pôle de 9 m. 832, à Paris de 9 m. 8101 et à l'équateur de 9 m. 781).

Unités dérivées. — Toutes les grandeurs géométriques, mécaniques et physiques peuvent se mesurer à l'aide des trois unités fondamentales ; elles *dérivent* ainsi de celles-ci et cette dépendance s'exprime, pour chaque unité dérivée, au moyen de ce qu'on appelle son *équation de dimensions* : l'unité de vitesse, par exemple, qui est le quotient d'une longueur L (chemin parcouru) par le temps T employé à parcourir cette longueur, est une unité dérivée qui a comme équation de dimensions :

$$V = \frac{L}{T}$$

qu'on peut écrire sous la forme : $V = [LT^{-1}]$.¹

Unités dérivées géométriques. — L'unité C. G. S. de surface est le centimètre carré $[L^2]$.

L'unité C. G. S. de volume est le centimètre cube $[L^3]$.

Unités dérivées mécaniques. — L'unité C. G. S. de *vitesse* est la vitesse d'un mobile animé d'un mouvement uniforme qui parcourt un centimètre par seconde $[LT^{-1}]$.

¹ On sait qu'on peut faire passer une quantité du dénominateur au numérateur d'une expression fractionnaire, en affectant cette quantité d'un exposant négatif.

Cette manière de faire est commode, surtout lorsqu'il s'agit de quantités qui sont des multiples de 10 et qu'on écrit : 10^2 , 10^3 , 10^6 , 10^{-2} , au lieu de respectivement 100, 1000, 1 000 000, $\frac{1}{100}$, le chiffre de l'exposant étant égal au nombre de zéros qui suivent 1. En effet, dans la notation avec exposants, on peut multiplier ou diviser par 10, 100, 1000, etc., simplement en ajoutant à ou en soustrayant de l'exposant, 1, 2, 3, etc., unités. Exemples : $10^4 \times 100 = 10^4 \times 10^2 = 10^6 = 1$ suivi de 6 zéros (1 000 000) ; $\frac{10^5}{100} = \frac{10^5}{10^2} = 10^5 \times 10^{-2} = 10^3 = 1000$.

Les équations de dimensions sont ordinairement mises entre crochets.

L'unité C. G. S. d'*accélération* est l'accélération d'un mobile dont la vitesse augmente d'un centimètre par seconde :

$$\text{Accélération} = \frac{\text{Vitesse}}{\text{Temps}} = \frac{LT^{-1}}{T} = [LT^{-2}].$$

L'accélération produite par la pesanteur, qui est de 9 m. 81 = 981 centimètres en moyenne à la latitude de 45°, est égale à 981 unités C. G. S. d'accélération.

L'unité C. G. S. de *force* est la force capable de communiquer une accélération de un centimètre à l'unité C. G. S. de masse (gramme-masse). On lui a donné le nom de *dyne*.

$$\text{Force} = \text{masse} \times \text{accélération} = [MLT^{-2}].$$

La dyne est ainsi 981 fois plus petite que le gramme-poids :
 $1 \text{ dyne} = \frac{1 \text{ gramme-poids}}{981}$. Réciproquement le gramme-poids vaut, dans nos latitudes, 981 dynes et le kilogramme-poids, 981 000 dynes.

L'unité C. G. S. de *travail mécanique* a reçu le nom de *erg* ; c'est le travail effectué par une force de 1 dyne qui déplace de 1 centimètre dans sa propre direction le mobile sur lequel elle agit :

$$\text{Travail} = \text{Force} \times \text{longueur} = MLT^{-2} \times L = [ML^2T^{-2}].$$

Un kilogramme-poids étant égal à 981 000 dynes et 1 mètre à 100 centimètres, on a évidemment :

$$1 \text{ kilogrammètre} = 981\,000 = 9,81 \times 10^7 \text{ ergs.}$$

L'unité C. G. S. de *puissance* est la puissance d'un moteur (courant, machine, etc.) qui produit un erg par seconde. Elle n'a pas reçu de nom spécial :

$$\text{Puissance} = \frac{\text{Travail}}{\text{Temps}} = \frac{ML^2T^{-2}}{T} = [ML^2T^{-3}].$$

2° Exposé des unités dérivées électriques et magnétiques et de leurs relations avec les trois unités fondamentales.

Nous verrons plus loin (ch. IV et V. 2°) qu'il y a une analogie remarquable entre les grandeurs magnétiques et électriques, d'une part, et les grandeurs mécaniques, d'autre part. Ces divers ordres de phénomènes en effet peuvent tous être considérés du point de vue des *attractions* qui se produisent soit entre pôles d'aimants, soit entre conducteurs porteurs de courants ou de charges électriques, soit enfin entre ces derniers et des pôles magnétiques.

Assimilant hardiment les attractions magnétiques et électriques à celles qui résultent de la gravitation universelle, dont la pesanteur n'est qu'un cas particulier, le physicien français Coulomb démontra expérimentalement que, de même que selon la loi de Newton, deux masses matérielles mm' , placées à la distance r , s'attirent réciproquement en raison directe du produit de ces masses et en raison inverse du carré de leur distance, de même deux masses magnétiques, ou électriques, exercent l'une sur l'autre une force d'attraction F qui est proportionnelle au produit mm' de ces masses et inversement proportionnelle au carré de leur distance r , en sorte que la formule générale de Newton, à savoir :

$$F = K \frac{mm'}{r^2}$$

est vraie aussi bien magnétiquement et électriquement que matériellement parlant.

Quant à la dépendance des phénomènes magnétiques et électri-

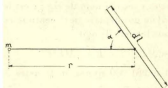


Fig. 15

ques, elle résulte de la formule de Laplace qui, vérifiée aussi expérimentalement, nous apprend que la force F qui s'exerce entre un élément dl de courant I et un pôle magnétique m , à la distance r , la droite qui les joint faisant un angle α avec la direction dl , est

en raison directe de dl , de m , de I et de $\sin \alpha$, et en raison inverse de r^2 , en sorte qu'on peut écrire (fig. 15) :

$$dF = K' \frac{mIdl \sin \alpha}{r^2}$$

Dans les deux formules ci-dessus donnant la valeur de la force F , K et K' sont des constantes qui dépendent du milieu dans lequel s'exercent les actions magnétiques et électromagnétiques.

Les deux formules de Coulomb et de Laplace, que nous venons d'apprendre à connaître, et celles que nous avons déjà appliquées précédemment, à savoir :

$$I = \frac{E}{R} \text{ (p. 19), } Q = IT \text{ (p. 20), } W = QE, \text{ etc.,}$$

nous permettent de définir comme suit les unités C. G. S. magnétiques et électriques :

L'unité C. G. S. de *masse magnétique* est l'intensité magnétique

d'un pôle d'aimant ponctuel qui exerce une répulsion de 1 dyne sur un second pôle identique situé à 1 centimètre de distance du premier.

En effet, si dans la formule de Coulomb : $F = \frac{mm'}{r^2}$ simplifiée en faisant le coefficient $K = 1$, on fait $m = m' = 1$ et $r = 1$ centimètre, on a bien $F = 1$ dyne. D'autre part, de la même formule on tire en posant $m = m'$:

$$m^2 = Fr^2, \text{ d'où } m = r\sqrt{F},$$

ce qui signifie qu'une masse magnétique est égale au produit d'une longueur par la racine carrée d'une force. L'équation de dimension correspondante est donc (p. 39) :

$$m = L \times \sqrt{MLT^{-2}}$$

ou
$$m = L.L^{1/2}M^{1/2}T^{-1} = [L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}].$$

L'unité C. G. S. d'intensité de courant est l'intensité d'un courant qui, parcourant un conducteur de 1 centimètre de long courbé en un arc de cercle de 1 centimètre de rayon, exerce, sur une unité de masse magnétique placée au centre de l'arc, une force égale à 1 dyne (fig. 16). En effet, si de la formule de Laplace simplifiée en faisant le coefficient $K' = 1$, on tire la valeur de I , on obtient :

$$I = \frac{dFr^2}{mdl \sin \alpha}.$$

On en tire aussi en faisant $\alpha = 90^\circ$

$$dF = \frac{Imdl}{r^2},$$

et en intégrant et en regardant I , m et r comme des constantes :

$$F = \frac{Iml}{r^2},$$

d'où l'on tire :

$$I = \frac{Fr^2}{ml}.$$

Une intensité de courant a donc comme équation de dimensions (p. 39 et 41) :

$$I = \frac{MLT^{-2} \times L^2}{L^{3/2}M^{1/2}T^{-1} \times L} = [L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}].$$

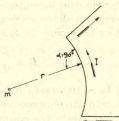


Fig. 16

L'unité C. G. S. de *quantité d'électricité* est la quantité que débite par seconde un courant d'une unité C. G. S. d'intensité. Cette définition résulte de la formule de Faraday $Q = IT$, dans laquelle on fait $I = 1$ et $T = 1$ seconde.

Équation de dimensions correspondante :

$$Q = L^{1/2} M^{1/2} T^{-1} \times T = [L^{1/2} M^{1/2}].$$

L'unité C. G. S. de *force électromotrice* est la force qui est nécessaire pour que l'unité C. G. S. de quantité Q effectue sous son action un travail mécanique de 1 erg. Cela résulte de la formule de Joule, $W = EQ$ (p. 20), dans laquelle on fait $E = 1$ et $Q = 1$.

Équation de dimensions correspondante :

$$E = \frac{W}{Q} = \frac{\text{Travail}}{\text{Quantité}} = \frac{L^2 M T^{-2}}{L^{1/2} M^{1/2}} = [L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}].$$

L'unité C. G. S. de *résistance électrique* est la résistance d'un conducteur dans lequel passe un courant d'une unité C. G. S. d'intensité lorsqu'une différence de potentiel d'une unité C. G. S. existe entre ses deux extrémités. De la loi d'Ohm, en effet, on tire :

$$R = \frac{E}{I} = \frac{L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}}{L^{1/2} M^{1/2} T^{-1}} = [L T^{-1}].$$

En se reportant à la page 38, on constate que l'équation de dimensions d'une résistance électrique est identique à celle d'une vitesse ; il n'en résulte pas cependant qu'une résistance soit identique à une vitesse.

L'unité C. G. S. de *capacité* est la capacité d'un conducteur qui renferme une quantité d'électricité égale à 1 unité C. G. S. sous une différence de potentiel égale à 1 unité C. G. S. De la formule $C = \frac{Q}{E}$ donnée à la page 24, on tire l'équation de dimensions :

$$C = \frac{L^{1/2} M^{1/2}}{L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}} = [L^{-1} T^2].$$

Unités C. G. S. pratiques. — Les unités C. G. S., telles que nous venons de les définir, ne sont pas toujours et toutes d'un emploi commode, parce que leurs valeurs sont tantôt beaucoup plus grandes, tantôt beaucoup plus petites que celles des grandeurs avec lesquelles on a le plus souvent à faire dans la pratique. On leur substitue alors d'autres unités dites *pratiques* qui sont des multiples ou des sous-

multiples décimaux des unités C. G. S. proprement dites et qui satisfont cependant aux relations simples que nous connaissons. Il faut par exemple, pour ne parler ici que de la loi d'Ohm, qu'en divisant la force électromotrice E exprimée en unités pratiques, par la résistance R exprimée en unités pratiques, on obtienne l'intensité I en unités pratiques également.

Valeurs des unités pratiques C. G. S. — L'unité pratique de quantité d'électricité est le *coulomb* (p. 19) qui est égal à la dixième partie (10^{-1}) de l'unité C. G. S. théorique.

L'unité pratique d'intensité de courant est l'*ampère* (p. 19) qui débite un coulomb par seconde. L'ampère est égal à la dixième partie (10^{-1}) de l'unité théorique C. G. S. (voir aussi p. 41).

L'unité pratique de résistance électrique est l'*ohm* (p. 19 et 42) qui vaut 1000 millions (10^9) d'unités C. G. S. théoriques. L'ohm est représenté par la résistance d'une colonne de mercure ayant, à la température de la glace fondante, une longueur de 1063 millimètres, une section constante et une masse de 14,4521 grammes.

L'unité pratique de force électromotrice est le *volt* (p. 19 et 42) qui est égal à 100 millions (10^8) d'unités C. G. S. théoriques.

L'unité pratique de travail est le *joule* qui vaut 10 000 000 (10^7) d'ergs.

L'unité pratique de puissance est le *watt* ou *joule-seconde*, qui vaut 10 000 000 (10^7) d'ergs-seconde.

L'unité pratique de capacité est le *farad*. C'est la capacité d'un condensateur qui, chargé par une force de 1 volt, contient un coulomb (p. 24). Comme on a $C \text{ farad} = \frac{Q \text{ coulombs}}{E \text{ volts}}$ (p. 24), on a aussi

$$1 \text{ farad} = \frac{10^{-1} \text{ u. C. G. S.}}{10^8 \text{ u. C. G. S.}} = 10^{-9} \text{ unités théoriques C. G. S. de capacité.}$$

Autres unités pratiques. — Parmi les unités pratiques que nous venons de passer en revue, il en est qui ont déjà reçu un autre nom soit avant, soit depuis l'adoption du système C. G. S.

Tel est le cas du joule qui vaut :

$$\frac{1}{9,81} = 0,102 \text{ kilogrammètre (p. 20 et 39).}$$

(Réciproquement : 1 kilogrammètre = 9,81 joules) ;

et du watt qui, valant un joule-seconde, est égal à 0,102 kilogrammètre-seconde.

Le cheval-vapeur (HP) de 75 kilogrammètres est donc égal à $9,81 \times 75 = 736 \text{ watts.}$

Enfin, rappelons ici que l'équivalent mécanique de la chaleur est :

$$426 \text{ kilogrammètres} = 1 \text{ grande calorie}$$

et représente ainsi :

$$9,81 \times 426 = 4180 \text{ joules.}$$

La *grande calorie* est la quantité de chaleur qui est nécessaire pour élever de un degré centigrade la température de 1 kilogramme d'eau, par opposition à la *petite calorie* qui, se rapportant à un gramme d'eau, est mille fois plus petite que la grande et vaut par conséquent 4,18 joules. Réciproquement :

$$1 \text{ joule} = \frac{1}{4,18} = 0,24 \text{ petite calorie.}$$

Un courant d'intensité I qui circule dans une portion de conducteur ayant entre ses deux extrémités une différence de potentiel égale à e , a , comme nous savons (p. 25), une puissance égale au produit eI .

D'après ce qui précède, la quantité de chaleur développée dans cette portion de conducteur pourra être exprimée en *petites calories* en multipliant la valeur eI de cette puissance exprimée en watts (ou joules-seconde) par l'équivalent mécanique de la chaleur dans le système des unités pratiques C. G. S., soit par 0,24 (petites calories) (ou ce qui revient au même en divisant ces mêmes watts par 4,18). Si dans l'expression : $P = eI$ on remplace e par sa valeur Ir tirée de la loi d'Ohm, on obtient :

$$P = Ir \times I = rI^2 \text{ watts} = rI^2 \times 0,24 \text{ petites calories (loi de Joule).}$$

Autres unités d'un usage courant. — Le *cheval-heure* est le travail mécanique fourni par une machine d'un cheval pendant une heure ; il vaut donc : 75 kilogrammètres \times 3600 secondes = 270 000 kilogrammètres ou $270\,000 \times 9,81 = 2\,648\,700$ joules.

Le *watt-heure* est le travail fourni par une machine (ou un courant) qui, ayant 1 watt de puissance, travaille pendant une heure. Le watt-heure vaut 3600 joules (1 watt \times 3600 secondes) ou $0,102 \text{ kilogrammètres} \times 3600 \text{ secondes} = 367,2 \text{ kilogrammètres.}$

Le *kilowatt-heure* est 1000 fois plus grand que le watt-heure ; il vaut donc

$$367\,200 \text{ kilogrammètres ou } 3\,600\,000 \text{ joules en chiffres ronds.}$$

L'ampère-heure vaut 3600 coulombs.

Multiples et sous-multiples décimaux des unités. — On a déjà constaté, en lisant ce qui précède, que les unités pratiques C. G. S. ont comme celles, déjà connues auparavant, du système métrique, leurs multiples et leurs sous-multiples, qu'on exprime en plaçant devant chaque unité les préfixes suivants :

a) *multiples* :

le préfixe	<i>méga</i>	vaut un million d'unités	(10^6)
"	<i>myria</i>	" 10 000 unités	(10^4)
"	<i>kilo</i>	" 1 000 "	(10^3)
"	<i>hecto</i>	" 100 "	(10^2)
"	<i>déca</i>	" 10 "	(10^1)

b) *sous-multiples* :

le préfixe	<i>déci</i>	vaut	0,1 d'unité	(10^{-1})
"	<i>centi</i>	"	0,01 "	(10^{-2})
"	<i>milli</i>	"	0,001 "	(10^{-3})
"	<i>micro</i>	"	0,000001 "	(10^{-6})

On dira ou écrira par exemple :

1 kilowatt	pour mille watts ;
1 mégohm	" un million d'ohms ;
1 milliampère	" un millième d'ampère ;
1 microvolt	" un millionième de volt ;
1 microfarad	" un millionième de farad ;
	etc., etc.

3^o Instruments et méthodes de mesure.

L'instrument de mesure électrique par excellence est le *galvanomètre*. C'est une véritable balance dans laquelle on pèse les courants. Il consiste en une aiguille aimantée mobile sur un axe et placée au centre ou dans le voisinage immédiat d'un cadre sur lequel est enroulée une certaine longueur de fil de cuivre à spires isolées les unes des autres par une enveloppe de soie. Les deux extrémités de ce fil aboutissent à deux bornes métalliques isolées que l'on peut relier aux fils extérieurs portant le courant à mesurer. Près de l'une des extrémités de l'aiguille est placée une échelle circulaire graduée dont le centre coïncide avec l'axe de l'aiguille. Le tout est monté sur un socle de telle façon qu'il soit facile d'*orienter* l'instrument, opération qui doit précéder chaque mesure et qui consiste à tourner ce socle

jusqu'à ce que l'extrémité de l'aiguille soit au zéro de l'échelle graduée.

Lorsqu'un courant est lancé dans les deux bornes du galvanomètre et parcourt le fil du cadre, l'aiguille aimantée est *déviée* de la direction sud-nord qu'elle doit au magnétisme terrestre et elle tend à prendre une direction perpendiculaire à celle de ce fil. Le sens de cette déviation change avec le sens du courant.

Deux courants d'intensité différente donnent sur le galvanomètre deux angles de déviation différents ; mais un courant d'intensité deux ne provoquera pas une déviation double de celle du courant d'intensité un. Autrement dit, les angles de déviation ne sont pas proportionnels aux intensités. Cela provient de ce que le champ magnétique terrestre se *compose* avec le champ produit par le courant que l'on mesure, la position à laquelle s'arrête l'aiguille étant la résultante de ces deux forces (ou champs). Il résulte de là que pour se servir utilement d'un galvanomètre comme d'instrument de mesure

des courants, il faut connaître la loi qui lie les déviations aux intensités. Cette loi varie elle-même avec la construction du galvanomètre (boussole des tangentes, des sinus, etc.). Nous ne pouvons entrer à ce sujet dans de longs développements ; nous nous contenterons de constater ici que, dans la plupart des applications de l'électricité à la télégraphie et à l'horlogerie, on s'est servi pendant longtemps de *boussoles électriques* dont l'échelle est simplement divisée en degrés d'arc. Les praticiens appelés à se servir de ces instruments en avaient une telle

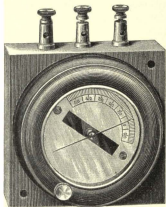


Fig. 17

habitude, ils connaissaient si bien les déviations qui correspondaient à telle ou telle intensité de courant nécessaire au bon fonctionnement des appareils qu'ils surveillaient ou qu'ils installaient, que la simple lecture en degrés de l'échelle leur fournissait des indications aussi utiles que celles que leur aurait données un galvanomètre gradué en unités d'intensité.

Parmi les boussoles électriques qui étaient autrefois les plus usitées,

la boussole télégraphique suisse mérite ici une mention spéciale. La figure 17 en donne une idée. L'aiguille aimantée et le cadre à fil de cuivre se trouvent sous la plaque portant l'échelle graduée ; l'axe de l'aiguille prolongé porte un index, dont l'extrémité peut parcourir les divisions de l'échelle.

Pour faciliter l'orientation, la partie circulaire, qui est en bois, et avec elle l'échelle, peuvent tourner facilement dans le socle carré également en bois. Ce dernier porte les bornes par lesquelles on introduit dans le fil galvanométrique les courants à mesurer. Ce fil fait *trente-deux tours* autour de l'aiguille aimantée, ce qui correspond à une sensibilité suffisante pour opérer avec des courants tels que ceux qui circulent à travers l'électro-aimant d'un ou plusieurs récepteurs.

Le tableau suivant donne en milliampères ou millièmes d'ampère les valeurs correspondant aux différentes déviations de la boussole télégraphique suisse à trente-deux tours :

Degrés de la boussole à 32 tours	Milli- ampères	Degrés de la boussole à 32 tours	Milli- ampères
0°	0,0	36°	12,4
2°	0,7	38°	13,7
4°	1,5	40°	15,0
6°	2,2	42°	17,6
8°	3,0	44°	20,2
10°	3,7	46°	22,8
12°	4,1	48°	25,4
14°	4,4	50°	28,0
16°	4,8	52°	32,8
18°	5,1	54°	37,6
20°	5,5	56°	42,4
22°	6,1	58°	47,2
24°	6,7	60°	52,0
26°	7,3	62°	61,4
28°	7,9	64°	70,8
30°	8,5	66°	80,2
32°	9,8	68°	89,6
34°	11,1	70°	99,0

Un autre type de galvanomètre très usité dans la pratique, est le *galvanomètre différentiel*. Cet instrument est semblable comme principe et comme aspect à la boussole télégraphique suisse ; toutefois, au lieu de n'avoir qu'un seul fil faisant trente-deux tours autour de

l'aiguille aimantée, il en possède deux, indépendants électriquement l'un de l'autre et enroulés de manière à produire sur l'aiguille aimantée des effets inverses. Ces deux fils étant parfaitement égaux comme longueur, section, nombre de tours et position par rapport à l'aiguille aimantée, deux courants égaux qui y circuleront auront pour effet

de laisser l'aiguille au zéro. Nous verrons plus loin que le galvanomètre différentiel rend de grands services dans la mesure des résistances électriques.

Lorsqu'on a affaire à des

courants de très faible intensité, on emploie des galvanomètres, dits « à grande sensibilité », chez lesquels le fil influençant « l'équipage mobile » fait un très grand nombre de tours sur son cadre.

Il existe un grand nombre de types de galvanomètres dans le détail desquels nous ne pouvons entrer ici. On en trouvera la description et les modes d'emploi dans les livres spéciaux concernant les mesures électriques¹. Nous nous bornerons à donner, dans les lignes qui suivent, quelques indications sur deux ou trois méthodes élémentaires de mesures applicables en électrochronométrie.

Mesure des résistances. — Elle se fait au moyen de boîtes de résistances étalonnées que l'on construit dans les principales fabriques d'appareils électriques et dont les figures 18 et 19 donnent la disposition schématique. Sur une plaque d'ébonite *a* sont fixées un certain nombre de lamelles de laiton $bb^1b^2...b^n$, dont la première *b* et la dernière b^n portent les deux serre-fils par lesquels on peut introduire le courant d'une source quelconque d'électricité. Ces lamelles sont isolées les unes des autres, mais peuvent être reliées deux à deux par des fiches métalliques *c* qu'on enfonce dans les trous *d* ménagés pour cela. De

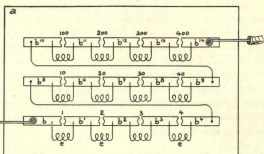


Fig. 18

¹ Consulter entre autres : KEMPE, traduit par H. Berger, *Traité élémentaire des mesures électriques*, Gauthier-Villars, Paris; H. ARMAGNAC, *Instruments et Méthodes de mesures électriques*, C. Naud, éditeur, Paris; ROBERJOT, *Travaux pratiques d'électricité industrielle*, Dunod, Paris 1920.

part et d'autre de chaque trou d sont soudées, au-dessous des lamelles adjacentes, les extrémités d'un fil de résistance connue e . Il y a donc autant de ces fils ou bobines e qu'il y a de trous à fiche.

Lorsque toutes les fiches c sont dans leurs trous d , le courant, entrant par le serre-fil de la lamelle b , parcourt successivement toutes

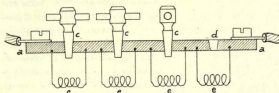


Fig. 19

les lamelles et toutes les fiches pour sortir par le serre-fil de la lamelle b'' ; le parcours se fait sans résistance appréciable. Mais, si l'on enlève une ou plusieurs des fiches c , on introduit, par le fait même, dans le circuit, les résistances des bobines e correspondantes. La résistance de chaque bobine e est marquée sur la plaque a en regard du trou auquel elle correspond. En disposant le tout comme l'indique la figure 18, c'est-à-dire en adoptant les résistances 1, 2, 3, 4, 10, 20, 30, 40, 100, 200, 300, 400 ohms, on peut introduire dans le circuit du rhéostat n'importe quelle résistance comprise entre 1 et 1110 ohms. Si l'on ajoutait quatre nouvelles bobines de 1000, 2000, 3000 et 4000 ohms, on pourrait mesurer, à un ohm près, n'importe quelle résistance comprise entre 1 et 11 110 ohms, et ainsi de suite. Les dixièmes d'ohm pourraient également se mesurer au moyen de quatre bobines de 0,1, 0,2, 0,3 et 0,4 ohm. Une boîte de résistance permettant de mesurer toutes les résistances comprises entre un dixième d'ohm et 1 111 110 ohms ne comprendrait que $4 \times 7 = 28$ bobines étalonnées.

Au lieu d'employer pour la mesure des fractions de l'ohm quatre bobines donnant les dixièmes d'ohm, on peut adapter au rhéostat un double fil de maillechort aa_1 (fig. 20) dont la résistance totale soit égale à l'unité, et qui puisse être intercalé dans le circuit d'expérience par ses deux extrémités bb_1 . Un curseur métallique c pouvant se déplacer le long

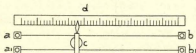


Fig. 20

du double fil, et faisant contact avec ses deux branches, permet d'introduire une résistance fractionnaire dont la valeur est donnée par la longueur bcb_1 de fil intercalé ; l'échelle graduée d indique cette valeur en dixièmes ou même en centièmes d'ohm.

La méthode la plus simple à employer pour mesurer une résistance inconnue est celle dite de *substitution*. Elle consiste à faire passer le courant d'une pile quelconque a (fig. 21) dans le fil b dont on cherche la résistance, et dans un galvanomètre c (boussole à 32 tours). On note la déviation de ce dernier, puis on remplace la résistance inconnue par une boîte de résistances étalonnées d , et l'on intercale des unités ou des multiples ou sous-multiples d'unité jusqu'à ce que la déviation du galvanomètre soit devenue la même que celle que l'on a notée ;

à ce moment la résistance marquée par les fiches enlevées est égale à la résistance b .

La méthode de substitution a l'inconvénient de donner des résultats peu exacts, lorsque, dans l'intervalle des deux opérations, le courant fourni par la pile varie d'intensité. Pour éviter cette source

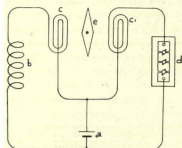


Fig 22

deux portions de courant circulant dans les fils c et c_1 se fassent équilibre, ou autrement dit n'aient plus aucune action sur l'aiguille e qui restera au zéro ; à ce moment la résistance du rhéostat est égale à b .

d'erreur, qui est d'autant plus grande que la pile employée est moins constante et la résistance à mesurer plus faible, on emploiera avec avantage le galvanomètre différentiel décrit ci-dessus ; après avoir relié la pile a , la résistance à mesurer b , le rhéostat d et les deux fils c et c_1 du galvanomètre différentiel, comme l'indique la figure 22, on réglera le rhéostat jusqu'à ce que les

Une troisième méthode à appliquer pour mesurer les résistances inconnues est celle du *pont de Wheatstone*, qui a sur celle du galvanomètre différentiel l'avantage de permettre l'emploi d'une boussole à simple fil donnant des résultats plus exacts. En effet, l'expérimentateur qui fait usage d'une boussole différentielle n'a pas toujours la certitude absolue que les deux fils influencent l'aiguille aimantée exactement de la même manière, ni qu'ils aient la même résistance ; de là une certaine incertitude au sujet de l'exactitude des résultats obtenus. Avec la méthode du pont de Wheatstone, les deux courants équilibrant leur action sur l'aiguille aimantée, circulent dans un seul et même fil.

La figure 23 donne le diagramme des communications de ce dispositif. Le courant de la pile p , arrivé en f , se partage en deux parties : l'une prend le chemin $fadgexc$, l'autre le chemin $fRegdbc$. Ces deux portions de courant circulent donc en sens inverse dans le galvanomètre g ; si elles sont d'intensité égale, elles se feront équilibre et l'aiguille de g restera au zéro. Or si l'on place dans la branche

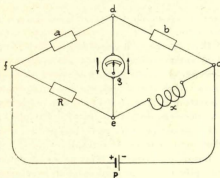


Fig. 23

x la résistance inconnue à mesurer, et en R la boîte de résistance étalonnée, il est évident que l'équilibre cherché existera si $R = x$, puisque chacune de ces résistances est parcourue par l'une des portions du courant passant par g .

Dans les deux autres branches du pont, on intercale d'habitude deux résistances nouvelles a et b qui, suivant leur rapport, permettent de mesurer des résistances x ayant une valeur supérieure ou inférieure aux limites extrêmes de la boîte de résistances R . En effet, il existe entre les résistances des quatre branches du pont la proportion

$$\frac{a}{R} = \frac{b}{x} \text{ d'où } ax = bR,$$

d'où encore

$$x = \frac{bR}{a} = \frac{b}{a} R.$$

Si, par exemple, on fait a 10 ou 100 fois plus grand ou plus petit que b , l'équilibre du galvanomètre se produira lorsqu'on aura fait R 10 ou 100 fois plus petit ou plus grand que x .

Mesure de la résistance intérieure des piles. — Les méthodes ci-dessus ne sont applicables telles quelles que lorsque la résistance

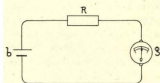


Fig. 24

à mesurer est *inerte*, c'est-à-dire lorsqu'elle n'est pas elle-même le siège d'une force électromotrice. Or la résistance intérieure d'un élément de pile n'est pas *inerte*, et pourtant il est souvent nécessaire de la connaître exactement, puisqu'elle constitue elle-même une

portion essentielle du circuit dont il s'agit de déterminer la résistance totale.

Dans ce cas, la manière la plus facile d'opérer, lorsqu'on dispose d'un nombre pair d'éléments en expérience, consiste à en former deux séries égales en tension ; on monte ces deux séries en *opposition* ; leurs forces électromotrices s'annulent, et l'on peut alors mesurer leur résistance totale soit par la méthode de substitution, soit par celle du galvanomètre différentiel.

Un autre procédé pour mesurer la résistance intérieure d'un élément de pile est le suivant :

Dans une première expérience, on détermine la déviation m^0 que produit sur un galvanomètre quelconque g (fig. 24) le courant fourni par l'élément en expérience b et circulant à travers une résistance quelconque du rhéostat R . Dans une seconde expérience, on intercale en dérivation sur la boussole une résistance g'

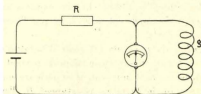


Fig. 25

(fig. 25) exactement égale à celle de g , et l'on réduit à la moitié de sa valeur primitive la résistance R . On a ainsi diminué de moitié la résistance extérieure du circuit (les fils de liaison étant supposés assez peu résistants

pour pouvoir être négligés), et l'on a, en appelant R la résistance du rhéostat, B celle du galvanomètre, W la résistance de l'élément, E sa force électromotrice, I et I_1 les intensités du courant :

Dans la première expérience

$$I = \frac{E}{W + R + B} \quad (1)$$

Dans la seconde

$$I_1 = \frac{E}{W + \frac{R + B}{2}} \quad (2)$$

Or la moitié seulement du courant I_1 passe par le galvanomètre g ; on aura donc aussi :

$$\frac{I_1}{2} = \frac{E}{2W + R + B} \quad (3)$$

Ce courant $\frac{I_1}{2}$ produit sur la boussole une certaine déviation n° plus petite que m° , et que l'on note.

Dans une troisième expérience, on éloigne de nouveau la résistance g' , et l'on modifie R jusqu'à ce que l'on retrouve au galvanomètre la déviation n° de la seconde expérience. A ce moment on a :

$$\frac{I_1}{2} = \frac{E}{W + R_1 + B} \quad (4)$$

En combinant les équations (3) et (4), on obtient :

$$\frac{E}{2W + R + B} = \frac{E}{W + R_1 + B}$$

d'où
$$2W + R + B = W + R_1 + B,$$

d'où encore
$$R_1 - R = W,$$

ce qui signifie que la résistance intérieure cherchée est égale à la différence des résistances qu'avait le rhéostat dans la seconde et la troisième expérience.

Mesure de la force électromotrice des éléments de pile. — Le procédé le plus simple consiste à comparer les éléments inconnus avec des éléments Daniel, lesquels, comme nous savons, représentent à peu près des volts. La difficulté de l'opération consiste à se rendre indépendant des différences de résistances intérieures des éléments que l'on compare. Pour cela, on fait en sorte que les éléments inconnus et les connus travaillent sur le même circuit ; cela s'obtient en opposant les uns aux autres les deux espèces d'éléments. Soient par

exemple *b* les éléments inconnus (fig. 26) et *a* les connus ; on réunit par un fil direct *c* les pôles positifs des deux piles ; puis on intercale la boussole *d* dans le fil reliant les deux pôles négatifs ; enfin on ajoute, soit à l'une soit à l'autre des deux piles, des éléments jusqu'à ce que

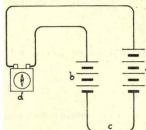


Fig. 26

l'aiguille du galvanomètre que l'on a préalablement orientée reste au zéro. A ce moment, les courants des deux piles en opposition se font équilibre, et comme tous les deux parcourent le même circuit, les forces électromotrices correspondantes sont égales. Si, par exemple, il faut trois éléments inconnus *b* pour faire équilibre à quatre éléments Daniel *a*, ayant chacun 1,10 (p. 57), on saura que chaque élément inconnu a une

force électromotrice de $\frac{a}{b} \times 1,10 = \frac{4}{3} \times 1,10 = 1,46$ volts.

Une autre manière de déterminer la force électromotrice d'un élément de pile est la suivante :

On place dans un même circuit un élément de force électromotrice connue, un galvanomètre sensible et une résistance connue de beaucoup supérieure à la résistance intérieure de l'élément en expérience ; on note la déviation du galvanomètre, puis on remplace l'élément connu par l'élément inconnu, et l'on règle la résistance du rhéostat de manière à reproduire la déviation notée. Les forces électromotrices des deux éléments sont alors dans le même rapport que les résistances, et l'on a :

$$\frac{E}{E_1} = \frac{R}{R_1}$$

Dans cette égalité ne figurent pas les résistances des éléments et du galvanomètre qui sont considérées comme négligeables par rapport à celles du rhéostat.

On peut aussi déduire très exactement la force électromotrice d'un élément dont on a déterminé préalablement la résistance intérieure, en le mettant en circuit avec un rhéostat et un galvanomètre de résistance connue, dont les indications puissent être facilement réduites en unités d'intensité (ampères) ; la force électromotrice cherchée est égale à l'intensité constatée à la boussole multipliée par la résistance totale du circuit (voir loi d'Ohm).

Enfin une méthode de mesure d'une force électromotrice très commode à employer lorsqu'on dispose d'une *pile-étalon* (voir plus loin, p. 57) et de deux boîtes identiques de résistances étalonnées (de 11 110 ohms par exemple), est celle de *Bouty*¹ : un circuit

est constitué comme l'indique la figure 27 où *a* est une petite batterie d'accumulateurs, *A* l'une des boîtes dont toutes les fiches sont en place, *B* l'autre boîte dont toutes les fiches sont enlevées, *G* le galvanomètre. On s'astreindra pendant la mesure à transporter toujours une cheville de l'une dans le trou correspondant de l'autre, de façon à maintenir constante la résistance de circuit de 11 110 ohms et par conséquent aussi le

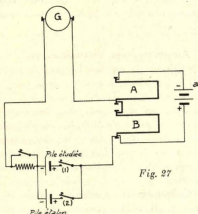


Fig. 27

courant i qui y circule. Entre les extrémités de l'une des boîtes, *B*, on dispose successivement la pile étudiée et la pile étalon par l'intermédiaire du galvanomètre *G* et d'une résistance de protection pouvant être mise en court-circuit. Soit r_1 la résistance de la boîte *B* pour laquelle le galvanomètre ne subit pas de déviation lorsqu'on ferme l'interrupteur (1) sur la pile étudiée de force électromotrice x ; on a alors

$$x = r_1 i.$$

Si d'autre part r_2 est la résistance de la boîte *B* pour laquelle cette même condition (galvanomètre immobile) est réalisée, lorsqu'on ferme l'interrupteur (2) sur la pile-étalon de force électromotrice E , on a :

$$E = r_2 i,$$

d'où l'on tire

$$\frac{x}{E} = \frac{r_1}{r_2} \text{ et } x = E \times \frac{r_1}{r_2}.$$

¹ Voir *Roberjot*, page 97.

Mesure des intensités. — Connaissant en ohms la résistance du circuit et en volts la force électromotrice du courant qui le parcourt, on en déduit par la loi d'Ohm l'intensité de ce courant en ampères.

Si, par exemple, on a une force électromotrice de douze volts et une résistance de circuit de deux cents ohms, on aura une intensité de courant de $\frac{12}{200} = 0,06$ ampère, soit six centièmes d'ampère.

Ampèremètres, voltmètres, etc. — Depuis que les applications de l'électricité ont fait les progrès énormes constatés au cours des 40 à 50 dernières années, on a partout adopté, dans l'industrie électrotechnique, pour mesurer les forces électromotrices, les intensités, les résistances, etc., des appareils commodes et transportables appelés voltmètres, ampèremètres, ohmmètres, etc., qui permettent des lectures rapides donnant directement, en unités pratiques (volts, décivolts, ampères, milliampères, ohms et fractions d'ohms, etc.), les valeurs que les opérateurs ont intérêt à connaître.

Galvanomètre à miroir. — Dans les laboratoires scientifiques et industriels où les mesures électriques doivent comporter un degré d'exactitude supérieur à celui que l'on peut obtenir au moyen des boussoles ou galvanoscopes décrits aux pages 46 et suivantes, on fait usage de galvanomètres dits à *miroir* dans lesquels l'équipage mobile (que celui-ci consiste en un ou plusieurs aimants comme dans l'appareil Thomson, ou en un cadre à fil comme dans celui de Deprez-d'Arsonval) est muni d'un petit miroir très léger sur la surface duquel un rayon lumineux, émis par une source de lumière fixe, est projeté. Lorsque l'équipage tourne d'un certain angle sous l'effet du courant à mesurer, l'image du rayon (spot) se déplace le long d'une règle horizontale graduée et convenablement disposée, d'une quantité d'autant plus grande que la distance de la règle au galvanomètre est elle-même plus grande.

En prenant les précautions voulues pour élever à son maximum le degré de sensibilité d'un galvanomètre à miroir, on arrive à avoir un déplacement du spot de plusieurs millimètres pour un microampère.

Galvanomètre balistique. — C'est un galvanomètre à miroir dans lequel l'équipage mobile est pourvu de petites masses augmentant son moment d'inertie et met alors un certain temps à se déplacer sous l'influence du courant. Lorsque ce dernier est très court, comme

celui qui résulte de la décharge instantanée d'un condensateur, par exemple (voir ch. V), la quantité d'électricité q en jeu aura traversé tout entière le fil du galvanomètre avant que l'équipage mobile ait commencé à se mettre en mouvement ; la déviation maximum du spot, correspondant à la brève impulsion donnée par la décharge (déviation qu'on appelle *élongation*) est proportionnelle à la quantité q , en sorte qu'on peut écrire :

$$q = k\theta,$$

θ étant l'angle de déviation et k un nombre constant qui dépend de la construction de l'instrument et qu'on nomme la *constante du galvanomètre balistique*. Si l'on fait $\theta = 1$, on a $q = k$ et alors la constante est égale à la quantité d'électricité qui produirait une élongation égale à une division de la règle graduée.

Étalons de force électromotrice. — Ce sont des éléments de pile placés dans des conditions de construction et d'emploi telles qu'à une température donnée, ils ont une force électromotrice invariable. Les piles-étalons dont on se sert le plus dans les laboratoires sont :

L'élément *Latimer-Clarke* (mercure, sulfate mercurieux, sulfate de zinc, zinc), qui donne 1,434 à 14 degrés et qui ne varie que d'un millivolt par degré ;

L'élément *Weston* (mercure, sulfate de mercure, sulfate de cadmium, amalgame de cadmium), qui, à 20°, a une force électromotrice de 1,0183 et dont la variation en fonction de la température est environ 30 fois plus faible que celle du Latimer-Clarke ;

L'élément *Daniel* (voir p. 61), qui, établi avec des précautions spéciales assurant l'invariabilité de concentration des solutions de sulfate de zinc et de cuivre, donne une force électromotrice de 1,10 sensiblement indépendante de la température.

Étalons de capacité. — Ce sont des condensateurs de capacité connue (voir p. 24 du ch. I et ch. V). Ils sont le plus souvent disposés dans des boîtes à chevilles, intercalant, selon les trous chevillés : 0,1, 0,2, 0,2, 0,5, etc., microfarad.

Potentiomètres. — Nous empruntons à l'ouvrage de M. Roberjot, déjà cité, les indications suivantes :

Le potentiomètre est une boîte de résistances de construction spéciale, dont le principe est le même que celui que nous avons appris à connaître, page 55, à propos du dispositif de Bouty. On peut réaliser un potentiomètre au moyen de deux boîtes *A* et *B* de 11 110 ohms (fig. 28), formant, avec une résistance réglable r , un circuit dans

lequel débitent un ou deux accumulateurs. Pour que le courant reste constant dans le circuit, on enlève toutes les chevilles de *A*, on laisse en place celles de *B* et l'on s'astreint pendant les mesures à ne pas faire subir au circuit d'autres modifications que celles résultant du transport des chevilles de l'une des boîtes dans les trous correspondants de l'autre, en sorte que la résistance de l'ensemble des deux boîtes restera constamment égale à

11 110 ohms. Nous savons que la différence de potentiel qui existe entre les bornes de la boîte *A* et à laquelle on oppose la force électromotrice à mesurer, est proportionnelle à la résistance introduite dans cette boîte, puisque le courant qui la traverse reste constant. Le facteur de propor-

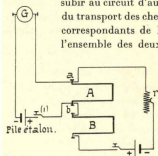


Fig. 28

tionnalité est déterminé au moyen d'une pile étalon et n'est pas en général un nombre simple. Toutefois, on peut régler le courant qui parcourt les résistances de cette boîte de telle façon que pour 1 ohm pris sur elle, il y ait entre ses bornes une différence de potentiel qui soit une fraction simple de volt, soit par exemple $\frac{1}{6000}$ volt.

Pour cela, nous mettrons entre *a* et *b* (fig. 28), en opposition avec la différence de potentiel existant entre ces deux points, une pile étalon Weston de 1,0183.

Puisqu'on veut avoir, entre *a* et *b*, $\frac{1}{6000}$ de volt par ohm, il faudra, pour obtenir 1,0183 volt, une résistance ϱ telle qu'on ait :

$$\varrho \times \frac{1}{6000} = 1,0183$$

et par suite faire $\varrho = 6000 \times 1,0183 = 6110$ ohms.

On prendra donc sur *A*, 6110 ohms (il y aura par suite dans *B*, 5000 ohms), et l'on fera varier la résistance réglable *r* jusqu'à ce que le galvanomètre *G* reste en équilibre quand on ferme l'interrupteur (1).

On voit, par l'exemple ci-dessus, que le potentiomètre est une véritable balance de volts. Par l'adjonction de shunts (dérivations) convenables, on pourra en faire une balance d'ampères et d'ohms.

Les potentiomètres les plus usités en France sont ceux de Carpentier et de Chauvin & Arnoux, en Allemagne ceux de Siemens & Halske, Hartmann & Braun (appelés *Compensateurs*), en Angleterre celui de la Weston Co., etc.

Electrochimie.

On a donné le nom d'électrochimie à la partie des applications de la science électrique dans laquelle sont en jeu des actions électriques et des actions chimiques.

Il y a ici trois cas à considérer :

1° Ou bien la réaction chimique que l'on observe a pour effet d'engendrer un courant, et alors on a affaire à des piles hydroélectriques primaires comme celle déjà étudiée partiellement à pages 25 et suivantes.

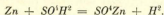
2° Ou bien, c'est au contraire le courant électrique d'un générateur quelconque qui produit une réaction chimique, et alors celle-ci a lieu dans des appareils spéciaux dits *électrolytiques* (Electrolyse).

3° Ou bien enfin on observe successivement dans un même appareil électrochimique les deux phénomènes mentionnés sous 2° et 1° ci-dessus, et alors nous sommes dans le domaine des piles hydroélectriques *secondaires* ou *accumulateurs*.

Le présent chapitre III sera donc divisé en trois sections.

1° Piles hydroélectriques primaires.

Dans un élément de Volta tel que le représente notre figure 5, la force électromotrice est due à l'action chimique de l'acide sulfurique SO^4H^2 sur la plaque (ou électrode) zinc Zn . Il se forme du sulfate de zinc et de l'hydrogène. La formule chimique est la suivante :



Nous avons déjà vu comment on a perfectionné la pile de Volta, soit en amalgamant le zinc, soit en substituant au cuivre (qu'attaque aussi l'eau acidulée) de l'électrode positive, une autre substance conductrice telle que le charbon, par exemple, inerte chimiquement vis-à-vis du liquide, soit enfin en diminuant autant que possible la résistance intérieure du générateur hydroélectrique, par rapprochement

ou augmentation en surface des deux électrodes, ou par intercalation des éléments en parallèle, etc. (voir p. 28 et suivantes).

Il nous reste à signaler ici un phénomène particulier dont nous n'avons pas encore parlé et auquel on a donné le nom de *polarisation*.

Polarisation d'un élément de pile. — Ce phénomène consiste en une diminution graduelle de l'intensité du courant, diminution qui est facilement observable au moyen d'un galvanomètre ou d'un ampèremètre relié directement pendant un certain temps avec les deux bornes de l'élément, et qui est d'autant plus considérable et rapide que le circuit extérieur a une plus faible résistance ou, ce qui revient au même, que l'intensité I du courant est plus grande.

La cause principale de la polarisation d'un élément voltaïque est celle-ci : le gaz hydrogène qui, ainsi que nous venons de le voir, est libéré par la réaction chimique du liquide acidulé sur le zinc, est entraîné par le courant (flèches f_1 de la fig. 5), sur la plaque positive qui se recouvre peu à peu d'une couche de plus en plus épaisse de ce gaz ; or celui-ci étant mauvais conducteur de l'électricité, la résistance intérieure augmente et diminue d'autant la force électromotrice disponible aux bornes de l'élément.

A cette première cause s'en ajoute une autre : l'hydrogène étant électro-négatif par rapport au zinc (voir la liste de la p. 26), le couple zinc-hydrogène se substitue peu à peu au couple primitif cuivre-zinc (respectivement charbon-zinc), et alors le sens du courant tend à se renverser dans le circuit ; de là le nom de *polarisation* employé pour caractériser ce phénomène.

On appelle *piles constantes* ou *impolarisables* celles qui sont construites de manière à empêcher ou tout au moins à diminuer dans de fortes proportions le dépôt d'hydrogène sur la plaque positive. Les meilleures sont celles chez lesquelles cette plaque est plongée dans une dissolution saturée d'un sel du métal dont elle est faite. L'hydrogène étant, dans ce cas, entièrement employé à séparer chimiquement le métal de sa dissolution, aucune portion de ce gaz ne recouvrira la plaque ; d'autre part, le métal ainsi *réduit* (mis en liberté) étant le même que celui de cette plaque, celle-ci s'en recouvre et conserve vis-à-vis de la plaque négative ses qualités électro-positives.

Les substances que l'on emploie pour absorber l'hydrogène avant qu'il ait pu se porter sur l'électrode positive, sont appelées *dépolarisantes*. Elles doivent être riches en oxygène, ce gaz ayant une grande affinité chimique pour l'hydrogène, avec lequel il forme de l'eau (H^2O) ; elles sont tantôt liquides, tantôt solides.

*Description de quelques piles pratiques utilisables
en Electrochronométrie.*

Piles constantes à deux liquides. — L'un des liquides est dit *excitateur* ; c'est celui dans lequel le zinc est plongé ; l'autre, dans lequel est immergée l'électrode positive, est le *dépolarisant*. Il faut s'arranger de telle manière que les deux liquides soient séparés l'un de l'autre sans que soit empêché le passage du fluide électrique d'une électrode à l'autre, à l'intérieur de l'élément. On arrive à ce résultat au moyen d'un *vase poreux*. Le type de la pile à deux liquides est l'élément *Daniel* dont la figure 29 donne l'aspect extérieur. Le zinc a la forme d'un cylindre creux qui est placé dans le vase extérieur contenant le liquide excitateur (dissolution de sulfate de zinc). Le vase poreux qui contient le liquide dépolarisant (dissolution concentrée de sulfate de cuivre) et l'électrode cuivre, est placé au centre du cylindre de zinc.

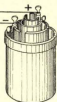
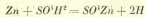
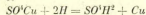


Fig. 29

Le circuit extérieur étant fermé, le zinc attaqué donnera naissance à une nouvelle quantité de sulfate de zinc et à de l'hydrogène qui se portant au pôle positif, décomposera une certaine portion du sulfate de cuivre et produira ainsi, d'une part, de l'acide sulfurique qui régénérera le liquide excitateur et, d'autre part, du cuivre chimiquement pur qui se déposera sur la plaque de cuivre. Les formules chimiques correspondantes sont :



et



L'élément *Callaud* est semblable à celui de Daniel avec cette différence que le vase poreux est supprimé (et avec lui une notable partie de la résistance intérieure), la séparation des deux liquides étant obtenue automatiquement par la différence de leurs densités (fig. 30). Des cristaux de sulfate de cuivre déposés au fond du vase extérieur où se trouve aussi l'électrode cuivre, entretiennent la saturation du liquide dépolarisant.

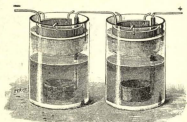


Fig. 30

La disposition de la pile *Meidinger* (fig. 31) est la même en principe que celle de Callaud ; toutefois, c'est un ballon à long col et à grande capacité qui contient la provision de sulfate de cuivre.

Citons parmi d'autres piles à deux liquides celle de *Bunsen* à vase poreux, dans laquelle l'électrode positive, qui est du charbon de cornue, plonge dans une dissolution aqueuse d'acide nitrique et l'électrode négative, qui est du zinc, dans de l'eau contenant de 10 à 12 pour cent d'acide sulfurique ; celle de *Radiguet* où l'on emploie comme dépolarisant une dissolution de bichromate de potasse agissant sur l'électrode charbon et comme liquide excitateur de l'acide sulfurique dissous à raison de 10 % dans de l'eau ; le zinc plonge dans une petite cuvette de mercure entretenant l'amalgamation. Dans les piles *Grenet* et *Trouvé*, qui sont aussi à base de bichromate de potasse, les deux

liquides (excitateur et dépolarisant) sont mélangés, ce qui entraîne la suppression du vase poreux. D'autres piles à deux liquides, plus modernes, sont : celle de *Lalande & Chaperon* dans laquelle le liquide excitateur est une dissolution de potasse caustique et le dépolarisant du bioxyde de cuivre ; celle de *Wedekind*, qui

est analogue à la précédente et dont le vase extérieur en fer, hermétiquement fermé, est recouvert à l'intérieur d'oxyde de cuivre qui se réduit, à circuit extérieur fermé, en cuivre métallique, mais peut être facilement régénéré en quelques heures par simple chauffage.

Les éléments à liquide excitateur alcalin (potasse ou soude caustique) ont une force électromotrice relativement faible (de 0,7 à 1,1 volt), mais sont d'une constance remarquable. Le plus petit élément du type

Wedekind, dont la figure 32 donne l'aspect extérieur et qui a comme dimensions d'encombrement $37 \times 120 \times 190$ mm., peut

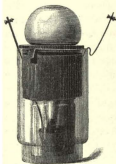


Fig. 31

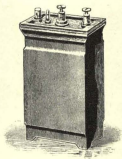
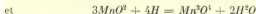
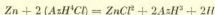


Fig. 32

livrer 35 ampères-heures avec une dépense maximum de 0,8 ampère. Sa résistance intérieure n'est que de 0,03 ohm. Le plus grand élément Wedekind, de $290 \times 120 \times 500$ mm., qui pèse 47 à 50 kilos et a une résistance intérieure de 0,1 à 0,001 ohm, peut livrer 1000, 900, 760 et 687 ampères-heures, selon que l'intensité du courant pris aux bornes de l'élément, est de respectivement 10, 20, 40 ou 41 ampères. (ZACHARIAS : *Elektrotechnik für Uhrmacher.*)

Pile à dépolarisant solide. — Le type le plus répandu de cette espèce de pile est celui de *Leclanché*, où l'on emploie comme liquide excitateur une dissolution aqueuse de chlorhydrate d'ammoniaque AzH^4Cl (qui a la propriété précieuse de n'agir sur le zinc qu'à circuit fermé), et comme dépolarisant du bioxyde de manganèse (MnO^2) qui absorbe l'hydrogène en lui cédant une partie de son oxygène. L'électrode positive est toujours du charbon. Les deux formules des réactions chimiques sont :



ce qui signifie :

a) que le zinc décompose le chlorhydrate d'ammoniaque et forme du chlorure de zinc et de l'ammoniaque, qui restent dans le liquide, et de l'hydrogène qui se rend à l'électrode positive ;

b) que l'hydrogène rencontre le bioxyde de manganèse et le réduit à l'état de sesquioxyde.

Suivant les applications, on emploie :

la pile Leclanché à vase poreux,

» » » sac,

» » » plaques mobiles agglomérées (fig. 33),

» » » aggloméré cylindrique.

La pile *Féry* constitue un perfectionnement très important et très apprécié de la pile charbon-zinc au sel ammoniac. Sa caractéristique principale est que l'électrode-zinc, au lieu d'être placée verticalement dans le vase de verre contenant le liquide, est couchée horizontalement sur le fond même de ce vase, au-dessous de l'élec-

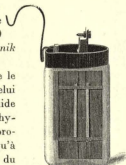


Fig. 33

trode-charbon qui, elle, reste verticale et a la forme d'un cylindre massif ou tubulaire (fig. 34). Le tout est disposé, cela va de soi, de telle manière qu'il n'y ait pas contact direct entre zinc et charbon. A la plaque de zinc est fixé un fil isolé qui traverse le liquide dans

toute sa hauteur et vient émerger à la partie supérieure de l'élément pour constituer là le pôle négatif, le pôle positif étant formé par l'extrémité supérieure du charbon.

Les avantages de la pile Féry sont les suivants :

a) Elle ne nécessite pas de dépolarisant spécial ni liquide ni solide, car elle fabrique elle-même son dépolarisant sous la forme de l'oxygène de l'air qui se dissout dans les couches supérieures du liquide ;

b) Le zinc, étant complètement immergé, est entièrement utilisé ; son usure est parfaitement régulière ;

c) L'élément reste propre ; il n'a pas de sels grimpants ;

d) Son entretien se réduit à remplacer le zinc lorsqu'il est complètement usé, à gratter les sels déposés sur le charbon et à substituer au liquide ancien chargé d'oxyde de zinc, un liquide neuf.

Piles sèches. — Dans ce type de piles, actuellement très répandu et qui est généralement basé sur l'emploi d'un dépolarisant solide, le bioxyde de manganèse, le liquide est immobilisé au moyen de substances gélatineuses ou autres, mélangées de poudres conductrices qui diminuent la résistance intérieure. Elles sont facilement transportables ce qui, dans certains cas, constitue un avantage important.

2° Electrolyse.

Le passage d'un courant à travers un corps simple a pour seul effet d'échauffer ce dernier. Par contre, si ce passage a lieu à travers un corps composé, celui-ci est décomposé en ses éléments chimiques ; on a donné à ce phénomène le nom d'*électrolyse*.

Voltamètre. — On sait que l'eau, par exemple, est une combinaison de deux corps gazeux, l'oxygène *O* et l'hydrogène *H*. Ces deux éléments se séparent l'un de l'autre lorsqu'on fait passer un courant à travers l'eau (H^2O), après l'avoir légèrement acidulée afin de la

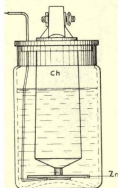


Fig. 34

rendre conductrice. L'opération se fait au moyen de l'appareil classique appelé *voltamètre* que représente la figure 35. C'est un verre dont le fond est traversé par deux fils de platine a et a' isolés électriquement l'un de l'autre et auxquels on relie les deux fils d'une pile b . Deux éprouvettes de verre c et c' , pleines d'eau, sont renversées au-dessus des extrémités intérieures des fils de platine. Aussitôt que le courant est fermé, la décomposition de l'eau se produit, et l'on constate que des bulles de gaz remplissent peu à peu les parties supérieures des éprouvettes ; celle correspondant au pôle positif de la source de courant b reçoit l'oxygène O , l'autre l'hydrogène H , le volume de ce dernier étant double de celui de O .

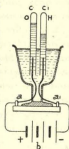


Fig. 35

Les substances qui, comme l'eau du voltamètre, sont décomposées par le courant, ont reçu le nom général d'*électrolytes* ; les fils ou lames métalliques qui plongent dans l'électrolyte et lui amènent le courant se nomment *électrodes* ; l'électrode positive est l'*anode*, l'électrode négative, la *cathode*. Les produits de la décomposition électrochimique ont été appelés *ions*, *anions*, lorsqu'ils se dirigent sur l'anode, *cathions*, lorsqu'ils se rendent à la cathode.

Lorsque l'électrolyte, au lieu d'être de l'eau acidulée, est une dissolution saline, par exemple de sulfate de cuivre SO^4Cu (fig. 36), le métal Cu libéré se porte (comme tout à l'heure l'hydrogène) sur la cathode, tandis que ce qu'on appelle le *radical*, SO^4 , se dirige en sens inverse et va à l'anode. Quel que soit d'ailleurs le métal de la dissolution, il se porte toujours sur la cathode. Il résulte de là que l'hydrogène joue, en électrolyse, le rôle d'un métal gazeux.

Lois de l'électrolyse ou de Faraday. — Elles se formulent comme suit :

1^o La quantité d'électrolyte décomposée est proportionnelle à la quantité d'électricité qui a traversé l'électrolyte.

2^o Quand une même quantité d'électricité traverse successivement plusieurs électrolytes, les poids des métaux déposés sont proportionnels à leurs équivalents chimiques.

Équivalents chimiques. — Si dans le circuit pile-voltamètre de la figure 35 on mesure, d'une part, le poids de zinc consommé pen-

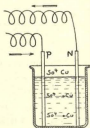


Fig. 36

dant le travail de la pile *b*, d'autre part, le poids d'hydrogène déposé dans l'éprouvette cathodique *H*, on constate que pour une quantité d'électricité de 96 500 *coulombs* ayant passé à travers le voltamètre, ces deux poids sont respectivement de 32,6 grammes (pour le zinc) et de 1 gramme (pour l'hydrogène).

Les chiffres 32,6 et 1 sont respectivement ce qu'on appelle les *équivalents chimiques* du zinc et de l'hydrogène. L'équivalent chimique de l'hydrogène est l'unité (1 gramme) à laquelle on compare les équivalents chimiques de tous les corps simples ; ces équivalents sont ainsi tous rapportés à une même quantité d'électricité qui est précisément celle de 96 500 coulombs mentionnée ci-dessus.

On appelle *équivalent électrochimique* d'un corps le quotient de son équivalent chimique par 96 500. Ainsi l'équivalent électrochimique du zinc est $\frac{32,6}{96\,500} = 0,000339$; ce dernier chiffre représente, en grammes, le poids de zinc que libérerait 1 coulomb ; de même l'équivalent électrochimique de l'hydrogène est

$$\frac{1}{96\,500} = 0,0000104 \text{ gramme} = 0,0104 \text{ milligramme.}$$

Le tableau ci-dessous ¹ donne les équivalents chimiques et électrochimiques de l'hydrogène et de quelques métaux, ces derniers étant indiqués en milligrammes par coulomb et en grammes par ampère-heure (1 ampère-heure = 3600 coulombs).

Noms des corps	Degré d'oxydation	Valence ²	Équivalents		
			chimiques (Poids atomique divisé par valence)	électrochimiques Poids libéré par coulomb	Poids libéré par ampère-h.
				en milligr.	en grammes
Aluminium . . .	Al ² O ³	3	9	0,0938	0,3377
Argent.	Ag ² O	1	107,6	1,1183	4,026
Calcium	CaO	2	19,95	0,208	0,748
Chlore	Cl	1	35,4	0,368	1,326

¹ Emprunté à BOUASSE, *Cours de Magnétisme et d'Électricité*, 3^{me} partie : « Étude du champ électrique ».

² On dit qu'un élément est *monovalent* par rapport à l'hydrogène, lorsqu'il est susceptible de remplacer l'hydrogène, atome à atome, dans la molécule d'un corps composé. Le chlore, le mercure, le sodium, etc., sont monovalents, l'oxygène, le soufre, le zinc, etc., sont bivalents, l'aluminium est trivalent, le platine tétravalent, etc.

Noms des corps	Degré d'oxydation	Valence	Equivalents		
			chimiques (Poids atomique divisé par valence)	électrochimiques Poids libéré par coulomb	Poids libéré par ampère-h.
				<i>en milligr.</i>	<i>en grammes</i>
Cuivre	CuO	2	31,6	0,329	1,189
Fer	FeO	2	27,9	0,291	1,047
Hydrogène . .	H ² O	1	1,0	0,01041	0,0375
Mercure	Hg ² O	1	200,—	2,08	7,488
Nickel	NiO	2	29,3	0,305	1,098
Oxygène	H ² O	2	8,0	0,0831	0,299
Platine. . . .	PtO ²	4	48,5	0,508	1,183
Plomb	PbO	2	103,2	1,074	3,868
Sodium	Na ² O	1	23,0	0,239	0,862
Zinc.	ZnO	2	32,6	0,339	1,220

Dans le cas de la figure 35, la pile qui sert de source de courant, consomme du zinc à raison de 32,6 grammes par chaque quantité de 96 500 coulombs qui passe dans le circuit du voltamètre, et produit un travail mécanique de (p. 20) :

$$W = QE = 96\,500 \text{ coulombs} \times E \text{ volts.}$$

Ce travail diffère donc selon que le voltage de la pile employée est plus ou moins élevé. Supposons, par exemple, qu'elle soit formée de deux éléments Daniel reliés en tension, 1,07 volts étant la force électromotrice de chacun d'eux, on aura :

$$W = 96\,500 \times 2 \times 1,07 = 206\,510 \text{ joules}$$

ou en chaleur (p. 44) :

$$206\,510 \times 0,24 = 49\,562 \text{ petites calories.}$$

Cette quantité de chaleur est employée non seulement à décomposer l'eau du voltamètre (cette électrolyse n'absorbe que 34 500 calories), mais encore à vaincre les résistances ohmiques du circuit.

Nous savons que lorsque l'hydrogène se trouve à l'état naissant, il a une grande tendance à brûler et par conséquent à produire, tout comme le zinc de la pile, une force électromotrice dite de polarisation (p. 60) qui est de sens inverse à celle produite par la combustion du zinc, et dont le voltage, déterminé expérimentalement, est de 1,48. Or, avec ses deux éléments Daniel en tension, notre pile a elle-même une force électromotrice directe de $2 \times 1,07 = 2,14$ volts supérieure

de $2,14 - 1,48 = 0,66$ volt à la force contre-électromotrice du voltamètre.

Il résulte de là : 1° qu'un seul élément Daniel de 1,07 volt serait incapable de produire l'électrolyse de l'eau puisque celle-ci nécessite à elle seule au moins 1,48 volt ; 2° que les 0,66 volt dont les deux éléments Daniel dépassent la force contre-électromotrice de 1,48 volt, sont précisément employés à vaincre la résistance électrique (évaluée en ohms) du circuit pile-voltamètre ; 3° enfin que la quantité de chaleur absorbée par cette résistance est de :

$$49\,562 - 34\,500 = 15\,062 \text{ petites calories.}$$

On peut mettre en évidence la force contre-électromotrice d'électrolyse en interrompant le courant et en reliant, tût après, les deux électrodes du voltamètre (ou plus généralement de l'appareil électrolytique quelconque dont on s'occupe), avec un galvanomètre, ainsi que l'indique la figure 37.

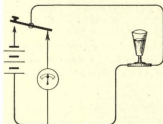


Fig. 37

Chaque métal d'électrolyte a sa force contre-électromotrice propre.

Anode soluble. — Lorsque l'électrode positive d'un appareil électrolytique est constituée par une lame du métal dont est faite

la dissolution à électrolyser, le radical (SO^4 par exemple, s'il s'agit de sulfate de cuivre), en se portant sur l'anode, se recombine avec le métal de celle-ci et crée là une quantité d'énergie égale à celle qui a dû être dépensée à la cathode ; il y a compensation entre énergie produite et énergie absorbée, et alors la force électromotrice de la pile est exclusivement employée à vaincre les résistances ohmiques du circuit.

Galvanoplastie. — Lorsqu'on place à l'électrode négative d'une cuve électrolytique à base métallique un objet quelconque, bon conducteur de l'électricité ou rendu tel, on peut, en se servant de baigns appropriés et dans la plupart des cas d'anodes solubles, le recouvrir d'une couche plus ou moins épaisse de cuivre, d'or, d'argent, de nickel, etc. L'objet ainsi *métallisé* peut affecter les formes et les dimensions les plus diverses ; il peut être une médaille, un bas-relief, une statue, un morceau de métal qu'il s'agit de protéger contre l'oxydation, un dessin de graveur sur cire ou sur bois à transformer en un

cliché de cuivre se prêtant à de nombreux tirages ; on dore ou argente jusqu'à des fruits, des insectes, des fleurs, des végétaux, des étoffes, etc.

Préparation de certains corps par voie électrochimique. —

L'électrolyse du sel marin (chlorure de sodium) donne comme produits séparés de la *soude* et du *chlore* ; ce dernier a été utilisé en quantités considérables pendant la guerre de 1914-1918 pour fabriquer les gaz asphyxiants. L'*aluminium*, métal brillant et léger (sa densité n'est que de 2,56) est actuellement tiré par voie électrolytique de l'argile ou terre glaise ; d'autres métaux tels que le fer, le magnésium, le sodium, le calcium, etc., et de nombreux ferro-alliages : le ferro-chrome, le ferro-silicium, etc., se préparent au moyen de fours électriques. Dans des usines électriques spéciales, on unit entre eux deux corps simples pour en former des corps composés ; c'est ainsi que le calcium tiré (à haute température) de la chaux par le charbon, produit du *carbure de calcium* qui, jeté dans l'eau, donne naissance à l'*acétylène*, gaz doué d'un grand pouvoir éclairant.

Enfin mentionnons ici la fabrication de l'acide nitrique par la combinaison directe de l'oxygène et de l'azote de l'air sous l'effet de l'arc électrique (procédé Birkeland et Eyde).¹

3^e Accumulateurs ou Piles secondaires.

La force contre-électromotrice d'électrolyse signalée à la page 68 en regard de la figure 37, est le point de départ des piles dites secondaires.

Supposons que dans un appareil électrolytique les électrodes soient en plomb et plongent dans de l'eau acidulée par de l'acide sulfurique (fig. 38) ; le circuit de la pile *a* une fois fermé, on n'aura pas immédiatement un dégagement des gaz *H* et *O*, comme dans le cas du voltamètre de notre figure 35, parce que le plomb métallique, même en la simple présence de l'air, est recouvert d'une mince couche d'oxyde *PbO* qui, à plus forte raison, existe aussi lorsque ce métal est plongé dans de l'eau acidulée.

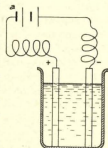
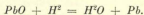


Fig. 38

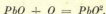
Il arrive alors que le gaz hydrogène *H* qui se porte, comme nous

¹ Voir *l'Électricité à la portée de tout le monde*, par Georges CLAUDE. Huitième édition, Paris, H. Dunod et E. Pinat, éditeurs.

savons, sur l'électrode négative de l'appareil électrolytique ci-dessus, se combine là avec l'oxygène de l'oxyde de plomb PbO et produit, d'une part, de l'eau H^2O , et, d'autre part, du plomb Pb à l'état pulvérulent, de couleur gris-noir, qui recouvre l'électrode négative. La formule chimique correspondante est :



Quant à la couche de PbO qui recouvre l'électrode positive, elle se change en oxyde rouge PbO^2 par l'apport d'un second atome d'oxygène et selon la formule chimique :



Ainsi, nos deux lames de plomb qui, au début de la fermeture du courant de la pile a , étaient chimiquement parlant du PbO , deviennent peu à peu, l'une du Pb noir, l'autre du PbO^2 rouge.

Mais le Pb à l'état naissant a la tendance de brûler comme le zinc d'une pile hydroélectrique ordinaire et engendre ainsi une force contre-électromotrice de polarisation. Si donc, après avoir éloigné la pile a de la figure 38, on relie les deux électrodes de plomb avec un récepteur quelconque (galvanomètre, électro-aimant polarisé, etc.), il se produira dans ce nouveau circuit un courant dit de *décharge* qui sera de sens inverse à celui qu'avait tout à l'heure le courant dit de *charge* de la pile a , et qui durera tant que durera lui-même le plomb pulvérulent Pb qui en est la cause.

Mais le courant de décharge provoquera lui aussi et à son tour, la décomposition de l'eau acidulée, dont l'oxygène se portera sur le plomb pulvérulent qu'il oxydera ($Pb + O = PbO$), et dont l'hydrogène, en se dirigeant sur le PbO^2 de l'autre électrode, lui enlèvera la moitié de son oxygène ($PbO^2 + H^2 = H^2O + PbO$).

Cette seconde transformation chimique ainsi causée par le courant de décharge, une fois terminée (disparition totale du plomb pulvérulent), ce courant lui-même cessera, en sorte que les deux lames de plomb seront revenues à leur état chimique primitif d'oxyde de plomb PbO .

On pourra recommencer autant de fois que l'on voudra, le cycle de ces deux expériences successives et alors on aura réalisé la pile secondaire dite de Planté qui a ceci de particulier que plus on multiplie, en les alternant, les deux opérations de charge et de décharge, plus aussi on augmente l'épaisseur des couches de Pb et de PbO^2 qui se déposent sur les électrodes pendant les charges, plus aussi augmente la durée

des décharges. Il arrive cependant un moment où cette épaisseur et cette durée atteignent une valeur fixe et s'y maintiennent ; on dit alors que la pile secondaire Planté est *formée*. On a donné à cet appareil le nom d'*accumulateur* parce qu'en effet il accumule et conserve jusqu'au moment où on peut l'utiliser par décharge, l'électricité empruntée pendant la charge à la pile primaire α de la figure 38, ou à tout autre générateur de courant continu.

Pour raccourcir ou même réduire à zéro le temps de formation d'un accumulateur au plomb, on fabrique maintenant des plaques toutes préparées, c'est-à-dire déjà recouvertes mécaniquement des composés chimiques nécessaires, à savoir, d'oxyde de plomb PbO sur les plaques négatives (litharge) et de peroxyde de plomb Pb^2O^4 (minium) sur les plaques positives. Pour assurer l'adhérence de ces composés sur les plaques de plomb, celles-ci sont *grillagées*, c'est-à-dire que leurs surfaces présentent des alvéoles dans lesquelles peuvent se loger et se maintenir solidement les pâtes de litharge et de minium.

Un accumulateur au plomb livre au commencement de la décharge une force électromotrice de 2,2 volts et à la fin de 1,9 volt. Lorsque ce dernier chiffre est atteint, il faut considérer la décharge comme terminée ; il serait nuisible en effet de la pousser plus loin ; on risquerait, en le faisant, de compromettre le bon fonctionnement ultérieur de l'appareil (sulfatage puis gondolement des plaques pouvant provoquer des courts-circuits intérieurs).

La *capacité* d'un accumulateur est la quantité d'électricité, ordinairement évaluée en ampères-heures, qu'il peut fournir après une charge complète. Cette quantité est, cela va de soi, inférieure à celle qu'on a *versée* dans l'accumulateur pour le charger.

On appelle *rendement* d'un accumulateur en *quantité* le rapport des ampères-heures dépensés pendant une décharge totale, aux ampères-heures reçus pendant une charge complète. Ce rendement varie selon que la décharge est plus ou moins rapide.

Le rendement en *énergie* d'un accumulateur s'obtient en tenant compte non seulement des ampères-heures, mais encore des volts. Si on a comme force électromotrice moyenne pendant la décharge 1,9 volt et pendant la charge 2,1 volts, que d'autre part le rendement en quantité défini ci-dessus soit de 85 %, par exemple, on aura comme rendement en énergie :

$$0,85 \times \frac{1,9}{2,1} = 0,85 \times 0,9 = 0,765 \text{ ou } 76 \frac{1}{2} \%$$

On peut faire avec les accumulateurs les mêmes couplages qu'avec

les piles primaires (en tension, en quantité, mixtes). Les forces électromotrices et les résistances intérieures aux bornes générales d'une batterie ainsi composée de plusieurs accumulateurs, se calculent ou se déterminent expérimentalement de la même façon que nous l'avons indiqué à pages 28 et suivantes pour les piles primaires hydro-électriques.

La force électromotrice d'un accumulateur au plomb étant de 2,2 volts au maximum à la décharge, il faudra que celle du courant de charge lui soit légèrement supérieure ; on compte normalement 2,5 volts par accumulateur intercalé en tension.

La résistance intérieure des accumulateurs dits *industriels* est très faible, quelques centièmes d'ohm par élément, étant données les très petites distances qu'avec les précautions nécessaires, les fabricants peuvent mettre entre les plaques de polarité contraire, sans que celles-ci cependant risquent de se toucher directement.

Différents types d'accumulateurs. — Jusqu'à ce jour, c'est l'accumulateur à électrodes de plomb qui a été le plus utilisé dans la pratique industrielle ; il a le défaut d'être lourd et encombrant. Aussi certains inventeurs se sont-ils efforcés de lui substituer d'autres types où l'on emploie des métaux plus légers tels que le cuivre, le zinc, le cadmium, le nickel, etc. Toutefois, ces diverses tentatives, sauf peut-être celle à laquelle Edison s'est consacré avec sa persévérance habituelle en employant le nickel, n'ont donné que des résultats plus ou moins satisfaisants, si bien qu'en fin de compte c'est encore l'accumulateur au plomb qui règne sur le marché industriel.

Nous n'avons ici ni la place, ni le loisir, d'entrer dans de longs développements sur la construction, les diverses applications, l'installation et l'entretien des accumulateurs. Le lecteur trouvera dans les livres des spécialistes en cette matière et surtout dans les instructions très précises dont les fabricants de ces appareils accompagnent toujours la livraison de leurs produits, tous les renseignements désirables. Nous nous contenterons de donner dans le paragraphe suivant quelques indications rapides concernant les méthodes qu'il est actuellement possible d'employer avec succès en électrochronométrie pour charger les batteries des grandes stations de distributions d'heure.

Il résulte de ce que nous savons maintenant sur les piles secondaires que la charge de ces appareils ne peut avoir lieu qu'au moyen d'une source d'électricité livrant un courant toujours de même sens. Il est indifférent d'ailleurs que cette source soit une pile primaire, ou un générateur mécanique d'électricité (dynamo) ou encore une déri-

vation prise sur les fils d'une distribution urbaine ou régionale d'éclairage ou de force électriques.

Dans ces divers cas, la seule précaution à prendre est de faire en sorte que la force électromotrice du courant de charge soit constamment dans le rapport voulu avec la force contre-électromotrice de la batterie en charge. On arrive à ce résultat soit au moyen de résistances ohmiques absorbant l'excès éventuel des volts du courant de charge, soit en groupant les éléments de la batterie d'accumulateurs de telle façon que l'équilibre de ces deux forces antagonistes existe constamment (conjoncteurs, disjoncteurs, régulateurs automatiques ou manuels de tension, etc.).

Redresseurs du courant de charge lorsqu'il est alternatif. —

Dans le cas, de plus en plus fréquent, où le courant que livre une distribution urbaine d'électricité, est alternatif, il faut néanmoins pouvoir s'en servir pour charger des accumulateurs. Ce problème important comporte plusieurs solutions que nous allons passer rapidement en revue.

La première consiste à intercaler entre le courant alternatif et la batterie un *transformateur dit rotatif* dont la figure 39 donne l'aspect extérieur et qui n'est autre chose qu'un moteur électrique pour courant alternatif (mono, bi ou triphasé), accouplé avec une machine

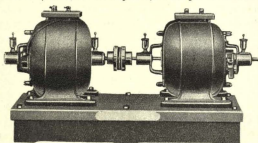


Fig. 39

dynamo-électrique livrant, aux bornes, du courant continu. C'est ce dernier courant qui, dirigé à travers un tableau dit de *charge* muni des commutateurs et appareils de contrôle (voltmètre, ampèremètre, etc.) nécessaires, opère, aux moments voulus, la charge des accumulateurs.

Une autre solution du problème qui nous occupe est l'emploi d'appareils spéciaux auxquels on a donné le nom de *souppes* et qui

peuvent être divisés en deux catégories selon que le principe qui est à leur base est d'ordre électrolytique ou électromagnétique.

Soupape électrolytique. — C'est M. Nodon qui a eu le premier l'idée de cette espèce de redresseur de courant. Elle repose sur le fait

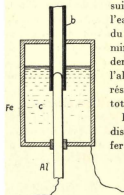


Fig. 40

suitant : lorsqu'on opère la décomposition de l'eau en employant comme électrode négative du fer et comme électrode positive de l'aluminium, l'oxygène qui se porte sur cette dernière se combine avec elle pour former de l'alumine (Al_2O_3) qui, doué d'une très grande résistance électrique, est capable d'interrompre totalement le courant électrolyseur.

La soupape Nodon, dont la figure 40 donne la disposition, comprend un vase cylindrique en fer *Fe* fermé à ses deux extrémités, celles-ci laissant passer, d'un côté une tige d'aluminium *Al* isolée électriquement du fer, de l'autre côté un manchon en ébonite *b* dont on peut régler la position en hauteur. A l'intérieur du vase *Fe* se trouve l'élec-

trolyte *c* qui est du phosphate d'ammoniaque.

Lorsque c'est le fer *Fe* qui est l'électrode positive et l'aluminium *Al*, l'électrode négative, le courant une fois fermé circule sans obsta-

cle. Mais si on change le sens du courant, la tige d'aluminium, devenue l'anode, se recouvre d'une couche d'alumine et interrompt le courant.

Les figures 40 et 41 et le texte suivant, empruntés à l'ouvrage de M. Devaux-Charbonel (*État actuel de la science électrique*, Dunod et Pinat, Paris) font voir comment M. Nodon a disposé son système de soupapes électrolytiques pour redresser un courant alternatif en courant continu.

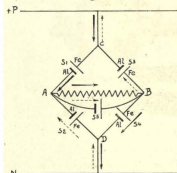


Fig. 41

« Soient *P* et *N* les deux conducteurs d'amenée du courant ; nous supposons pour l'instant que le courant va de *P* en *N* ; entre les deux conducteurs d'alimentation sont disposées quatre soupapes

S_1 , S_2 , S_3 , S_4 placées symétriquement de part et d'autre du circuit d'utilisation AB , mais n'ayant pas leurs électrodes orientées de la même façon. Le courant partant de P rencontre en C deux chemins différents : sur le chemin CB est la soupape S_3 dont l'anode est en aluminium ; nous avons vu que dans ce cas le courant ne peut pas passer. Au contraire, le chemin CA , sur lequel est la soupape S_1 dont l'anode est en fer laissera passer le courant. Arrivé en A celui-ci rencontre encore deux voies : le circuit d'utilisation AB et le circuit AD qu'il ne peut traverser, la soupape S_2 qu'il y rencontrerait ayant son anode en aluminium. Le courant traversera donc uniquement le circuit d'utilisation, de gauche à droite ; enfin, il traversera le circuit BD , la soupape S_4 , dont l'anode est le fer ne pouvant l'arrêter, et regagnera le pôle négatif N .

« Si maintenant le courant change de sens, N deviendra positif et comme la figure est symétrique et les soupapes de gauche orientées en sens inverse de celles de droite, il est facile de voir que le courant partant de D sera obligé de suivre le chemin DA , AB , BC pour regagner le négatif qui se trouve alors en P .

« Par suite, quel que soit le sens du courant, le circuit d'utilisation AB sera toujours parcouru dans le même sens, de gauche à droite.

« Si l'on porte en ordonnées l'intensité du courant et en abscisses les temps des périodes, on obtient pour le courant alternatif une courbe de forme sinusoïdale 1 (fig. 42), tandis que la courbe du courant traversant le circuit d'utilisation aura la forme redressée 2. M. Nodon ayant même remarqué que sa soupape forme un condensateur très puissant (un farad par centimètre carré, ce qui est énorme ; voir p. 24 du présent ouvrage), place une cinquième soupape S_5 en dérivation sur le circuit d'utilisation. Il obtient ainsi, non plus un courant simplement redressé, mais un courant ondulé, dont la représentation graphique est donnée par la figure 42-3. Ce courant ondulé n'est pas encore un courant continu

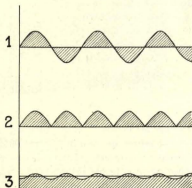


Fig. 42

constant, mais il s'en rapproche suffisamment pour les besoins ordinaires de la pratique (et entre autres pour la charge des accumulateurs).

« Le rendement des soupapes Nodon est de 75 à 80 %. Elles supportent un courant de 5 à 10 ampères par décimètre carré d'aluminium. L'appareil doit être refroidi par un ventilateur ou un courant d'eau, car il ne fonctionne régulièrement que si sa température est inférieure à 40 degrés. »

Une disposition utilisant une seule soupape Nodon, mais ayant un rendement bien inférieur à celui des quatre soupapes de la figure 41 en raison du fait

qu'ici l'on ne transforme en courant continu qu'une demi-alternance du courant alternatif sur deux, est représentée sur la figure 43 qui se comprend sans autre explication.

Soupape électromagnétique.

— La figure 44 donne la disposition schématique du redresseur à lame vibrante de la maison Favarger & C^{ie} (Neuchâtel, Suisse) et la figure 44 bis la vue d'ensemble de cet appareil.

Le fil de la bobine *E* est relié par les bornes 1 et 2 avec la source du courant alternatif (marquée 125 volts \sim sur la figure 44) à travers un interrupteur général *I*₁ et un condensateur *D*. Une lame vibrante *L*

en acier trempé, fixée en *K*, est polarisée par un aimant permanent qui n'est pas représenté sur la fig. 44, mais qui est bien visible au milieu de la figure 44 bis. La lame *L* qui est disposée au centre de

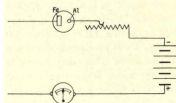


Fig. 43

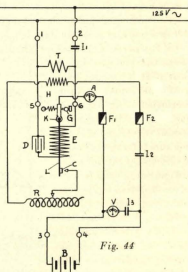


Fig. 44

la bobine *E*, est soumise à l'influence du champ alternatif et effectue ainsi des oscillations rapides dont la fréquence correspond exactement à celle des périodes du courant à redresser ; *L* est fixée en *K* et réglable là au moyen de la vis *G* et du ressort antagoniste *H*. Son extrémité inférieure porte un contact platiné *C* qui, à chaque vibration de la lame, vient toucher pendant un court instant la partie fixe de l'interrupteur automatique *C*. Ce dernier ne permet le passage du courant alternatif 1-2 dans le circuit d'utilisation (en l'espèce les accumulateurs *B* qu'il s'agit de charger) que pendant une fraction de période comprise entre les deux instants où le courant change de sens. Cette disposition a pour effet : 1° de n'envoyer dans le circuit d'utilisation que des émissions toujours

de même sens, et 2° d'opérer les fermetures et les ouvertures du courant aux moments où la tension est nulle, ce qui élimine toute possibilité d'étincelle en *C*.

Le transformateur *T* dont le primaire est intercalé en parallèle avec la bobine *E*, abaisse la tension du courant alternatif à la valeur correspondant au nombre des accumulateurs à charger. Le réglage de la vis *G* qui permet d'allonger ou de raccourcir quelque peu la durée du contact *C*, doit être effectué chaque fois que le nombre des accumulateurs à charger, varie.

La self-induction de la bobine *E* provoquant un décalage en ar-

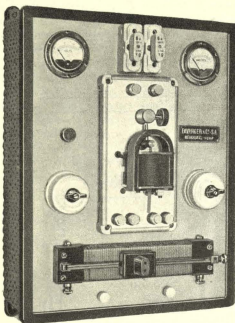


Fig. 44 bis

rière des phases du courant alternatif, on redresse ce décalage au moyen du condensateur D intercalé en série avec E .

Le circuit d'utilisation comprend :

Le secondaire du transformateur T , une résistance réglable R , le contact C , la lame vibrante L , le pilier de fixation K , l'ampèremètre A , le fusible F_1 , la batterie en charge B , l'interrupteur I_2 , le fusible F_2 .

V est un voltmètre permettant de contrôler la tension de la batterie B au moyen du bouton interrogateur I_1 .

Redresseurs à vapeur de mercure. — Les lampes ou tubes à vapeur de mercure ont constitué, il y a quelques années déjà, l'un des

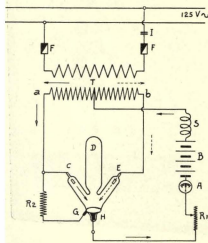


Fig. 45

stades d'évolution de l'industrie de l'éclairage électrique. Leur inventeur, M. Cooper Hewitt, prit comme point de départ de son système, le tube à air raréfié dit de *Geissler* (voir les manuels de physique) dans lequel il fait l'anode en fer, en nickel, en graphite, etc., et la cathode en mercure. Lorsqu'on relie les électrodes ainsi constituées avec une source de courant de voltage et d'intensité convenables, de la vapeur de mercure se dégage de la cathode, se répand dans l'air raréfié du tube et

devient lumineuse (lumière froide) ; toutefois la lampe ne devient éclairante qu'après un *amorçage* spécial que l'on peut effectuer de diverses manières (décharge à haute tension, électroaimant d'allumage, etc.) et qui a pour but et pour effet de faire éclater un arc électrique momentané à partir de la cathode ; cet arc, une fois rompu, a amorcé la lampe qui dès ce moment peut fonctionner avec un courant à voltage relativement bas, tel que celui des distributions d'éclairage ordinaires à incandescence ou à arc.

Ce qui précède s'applique au cas où ce courant est continu. S'il

est alternatif, il se produit certaines difficultés d'alimentation dans le détail desquelles nous n'avons pas à entrer ici. De la *répugnance* qu'a la cathode à laisser passer le courant, il résulte qu'un tube de Cooper Hewitt ne sera traversé que par les demi-périodes (ou alternances) d'un courant alternatif, et que dès lors cet appareil est capable de jouer le rôle d'une soupape.

La figure 45 donne le schéma des connexions d'un redresseur de courant à vapeur de mercure, tel qu'on le fabrique en Allemagne et en Suisse.

C D E est la lampe proprement dite qui est pourvue d'une cathode en mercure *H* et de deux anodes en graphite. *G* est l'anode de mise en marche, *T* est un transformateur statique dont le secondaire *ab* est réglable. R_1 et R_2 sont deux résistances réglables, *A* un ampèremètre, *S* une bobine de self, *I* l'interrupteur général, *FF* des fusibles et enfin *B* la batterie en charge.

Phénomènes magnétiques et électromagnétiques.

Induction.

1^o Magnétisme et électromagnétisme.

Généralités. — On appelle *aimant naturel* un minéral formé en majeure partie d'oxyde de fer, Fe^3O^4 , qui a la propriété d'attirer certains métaux.

On peut faire un *aimant artificiel* en frottant un morceau d'acier trempé dur avec un aimant naturel. Lorsqu'un morceau d'acier ainsi aimanté, soit par frottement, soit de toute autre façon, a la forme d'un barreau droit (ou recourbé) plus long qu'épais, son aimantation se manifeste par deux centres attractifs qui se trouvent dans le voisinage des deux extrémités du barreau et auxquels on a donné le nom de *pôles magnétiques*.

L'aiguille aimantée de la boussole ordinaire des marins n'est elle-même qu'un barreau aimanté droit, à extrémités amincies, qui peut tourner dans un plan horizontal autour d'un axe vertical placé à la moitié de la longueur du barreau ; cet axe peut être soit un pivot, soit un fil de suspension. L'aiguille aimantée prend dans ce plan la direction nord-sud due au magnétisme terrestre ; c'est toujours la même extrémité qui se dirige vers le nord de la sphère terrestre, tandis que l'autre extrémité, toujours la même aussi, montre le sud ; la première a reçu le nom de pôle *nord* (pôle bleu, pôle marqué), la seconde celui de pôle *sud* (pôle blanc ou non marqué).

La loi fondamentale des phénomènes magnétiques est celle-ci : les pôles de même nom se repoussent, les pôles de noms contraires s'attirent.

La loi de Coulomb, dont nous avons donné l'énoncé et la formule à page 40, permet de calculer la force avec laquelle deux masses ou, ce qui revient au même, deux pôles magnétiques s'attirent ou se repoussent lorsque chacune de ces masses est supposée concentrée en un point. D'autre part, cette même loi de Coulomb nous a appris que lorsque deux masses égales sont placées à r centimètres de distance

l'une de l'autre, elles exercent l'une sur l'autre une action égale à F dynes et que la valeur de chacune d'elles est (p. 41) :

$$m = r\sqrt{F}.$$

Fantôme et champ magnétique. — En projetant de la limaille de fer sur une feuille de papier blanc placée au-dessus d'un aimant, on constate que les grains de limaille se répartissent de manière à former des lignes courbes régulières allant d'un pôle à l'autre (fig. 46). Une petite aiguille aimantée, suspendue à un fil et amenée aussi près que possible de la feuille de papier, s'oriente dans une direction qui est toujours tangentielle à la courbe dont elle est le plus rapprochée. Les courbes dessinées par les grains de limaille sont la représentation matérielle de ce qu'on appelle les *lignes de force magnétiques*. Ces lignes, serrées et denses près des pôles, s'écartent les unes des autres dans les autres régions. Il va de soi qu'elles occupent non seulement le plan de la feuille de papier, mais tout l'espace environnant le barreau aimanté, en sorte que si ce barreau est droit, par exemple, il constitue par rapport à l'ensemble des lignes de force, l'axe d'un ellipsoïde de révolution. Cet espace a reçu le nom de *champ magnétique*.

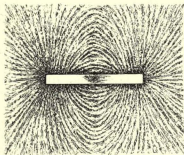


Fig. 46

Intensité du champ magnétique en un point donné. — Cette intensité est, par définition, la force magnétique qui s'exerce sur l'unité de masse placée en ce point. Très grande aux deux pôles où les lignes de force sont denses, cette force va en diminuant d'intensité à mesure qu'on s'éloigne d'eux.

La force magnétique qui agit sur l'unité de masse $m = 1$, étant égale à l'intensité du champ symbolisé par la lettre H , celle qui agirait sur une masse m fois plus intense serait elle-même m fois plus grande. On aura donc :

$$f = mH,$$

d'où l'on tire :
$$H = \frac{f}{m} = \frac{\text{force}}{\text{masse magnétique}}.$$

L'équation de dimensions du champ magnétique est donc (p. 39 et 41) :

$$H = \frac{LMT^{-2}}{L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}} = [L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1}].$$

H devient égal à l'unité quand on fait f et m égaux à 1 en sorte que l'on peut écrire :

L'unité C. G. S. d'intensité de champ magnétique, qu'on appelle le *gauss*, est celle qui exerce sur une unité de masse magnétique une force égale à une dyne :

$$1 \text{ gauss} = \frac{1 \text{ dyne}}{1 \text{ unité de masse magnétique}}.$$

Champ magnétique terrestre. — Pour un aimant de très grandes dimensions, tel, par exemple, que celui qu'on suppose s'étendre du pôle nord au pôle sud de la terre, les lignes de force existant entre ces pôles peuvent être considérées comme étant parallèles entre elles, sur un espace de la surface

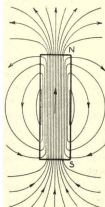


Fig. 47

terrestre relativement petit (comme on l'admet aussi pour les verticales de deux points terrestres relativement peu éloignés l'un de l'autre). Mais alors, dans un champ magnétique à lignes de force parallèles, l'intensité du champ est la même en tous les points et le champ lui-même est dit *uniforme*. C'est le cas du champ magnétique terrestre dont la valeur était à notre latitude et au 1^{er} janvier 1900 de 0,466 gauss.¹

Flux de force magnétique. — Une surface plane placée en une région quelconque d'un champ magnétique perpendiculairement aux lignes de force, sera traversée par un certain nombre de ces lignes. Supposons que cette surface plane soit elle-même constituée par

une couche infiniment mince de magnétisme d'une valeur telle que chaque centimètre carré renferme une unité de masse magnétique ; on appelle *flux de force* la somme des lignes de force qui traversent la surface considérée.

Dans un aimant droit tel que celui de la figure 47, les lignes de force

¹ Cette intensité varie dans un même lieu à courtes et à longues périodes.

sont considérées comme existant non seulement dans l'espace qui entoure le barreau, mais aussi dans l'intérieur de ce barreau, d'un pôle à l'autre. On admet même qu'elles passent toutes par une section faite perpendiculairement à la longueur du barreau à égale distance à peu près des pôles, qu'elles y sont parallèles entre elles (champ uniforme), qu'enfin elles ont un sens de circulation et sortent de l'extrémité nord de l'aimant, pour de là se répandre dans l'espace extérieur et rentrer en lui par le pôle sud. Leur ensemble forme le flux de force défini ci-dessus et le circuit ainsi parcouru par ce flux présente une certaine analogie avec le parcours intérieur et extérieur d'un générateur d'électricité qui travaille sur un fil reliant ses deux pôles. C'est ce qu'on appelle le *circuit magnétique*.

L'unité C. G. S. de flux de force magnétique a reçu le nom de *maxwell* ; c'est le flux de force produit par un champ magnétique d'un gauss traversant une surface d'un centimètre carré.

Flux de force Φ = surface \times champ magnétique H ,
d'où $\Phi = L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1} = [L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}]$.

Induction magnétique. — On appelle ainsi le quotient du flux de force Φ qui traverse une surface donnée par l'aire de cette surface et on la représente par la lettre majuscule anglaise \mathfrak{B} :

$$\mathfrak{B} = \frac{\Phi}{s} \text{ d'où } \Phi = \mathfrak{B}s.$$

Dans un aimant droit ayant 5 centimètres carrés de section et parcouru par un flux de force de 3000 maxwells, la valeur de l'induction magnétique correspondante sera de :

$$\mathfrak{B} = \frac{3000}{5} = 600 \text{ unités C. G. S. d'induction.}$$

L'unité d'induction magnétique s'appelle *gauss* comme celle du champ magnétique, qui lui est homogène.

Moment d'un aimant. — Un aimant peut être considéré comme constitué par deux masses magnétiques $+m$ et $-m$ égales et de signes contraires et concentrées en ses pôles N et S . Si cet aimant est placé dans un champ magnétique uniforme ayant une intensité égale à l'unité (fig. 48) et si on appelle l la distance de ses deux pôles, il sera sollicité à s'orienter parallèlement aux lignes de force du champ par deux forces égales et de sens contraire f et f'



Fig. 48

formant couple. On appelle moment magnétique \mathcal{M} d'un aimant le produit de l'intensité magnétique m de chaque pôle par la distance l :

$$\mathcal{M} = ml.$$

Équation de dimensions correspondante :

$$\mathcal{M} = L^{5/2} M^{1/2} T^{-1} \times L = [L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}].$$

L'unité C. G. S. de moment magnétique est le moment d'un aimant dont les pôles sont distants de 1 cm. et ont chacun une masse magnétique égale à l'unité C. G. S. correspondante.

Intensité d'aimantation. — C'est l'action magnétique d'un aimant rapportée à l'unité de volume ; elle est donnée par la formule :

$$J = \frac{\mathcal{M}}{V},$$

où J représente l'intensité d'aimantation de l'aimant considéré, \mathcal{M} son moment et V son volume.

Équation de dimensions :

$$J = \frac{\text{Moment}}{\text{Volume}} = L^{5/2} M^{1/2} T^{-1} \times L^{-3} = [L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1}].$$

Aimantation par influence ou par induction. — Si dans le champ magnétique H de la figure 48 on place, au lieu d'un aimant NS , un morceau de fer doux (fig. 49), on constate que ce dernier acquiert toutes les propriétés d'un aimant : il s'oriente parallèlement aux lignes de force du champ et présente un pôle sud à l'extrémité par laquelle ces lignes entrent en lui et un pôle nord à l'extrémité par laquelle ces lignes sortent de lui.

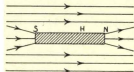


Fig. 49

Cette aimantation, dite par influence ou par induction, cesse quand on éloigne le barreau de fer doux du champ magnétique qui l'a momentanément provoquée ; elle se rétablit de nouveau quand on remet le barreau dans le champ.

Mais si le barreau, au lieu d'être en fer doux très pur, est en fer impur ou en acier, l'aimantation produite en lui par une première plongée dans le champ magnétique H , ne disparaît pas totalement lorsqu'on l'en sort ; cette aimantation subsiste dans une proportion plus ou moins considérable, même après que l'influence du champ H a disparu.

On appelle *magnétisme temporaire* celui qui existe seulement pendant l'influence, *magnétisme rémanent* ou *résiduel* celui qui persiste après que l'influence a cessé, *force coercitive* la propriété que possèdent certaines variétés de fer (aciers) de garder après avoir été soumises à une première induction, une partie de l'aimantation que cette induction avait développée en elles.

Corps magnétiques et diamagnétiques. — Les différents corps sont tous plus ou moins sensibles à l'influence d'un champ magnétique, mais ils le sont différemment : les uns se comportent comme le fer et ses variétés, c'est-à-dire que leur pôle sud se trouve à celle des deux extrémités du barreau en expérience, par laquelle entrent les lignes de force du champ inducteur (fig. 49), et le pôle nord à l'autre extrémité (lignes sortantes) ; on les appelle *magnétiques* ; les autres corps au contraire ont leur pôle sud et leur pôle nord placés précisément à l'inverse de ce que nous venons d'indiquer (pôle nord aux lignes de forces entrantes ; pôle sud aux lignes de force sortantes) ; on les appelle *diamagnétiques* ; leurs propriétés diamagnétiques sont d'ailleurs toujours très faibles, tandis que celles des métaux magnétiques, tels surtout que le fer et ses variétés (aciers divers, fonte de fer, etc.), sont ou peuvent être très intenses.

Tous les aimants artificiels que l'on fabrique actuellement et qui, dans la plupart de leurs applications, doivent être aussi puissants que possible, autrement dit conserver une aimantation résiduelle qui soit très grande par rapport à l'aimantation temporaire maximum qu'ils sont susceptibles de recevoir d'un champ inducteur lui-même puissant, — tous ces aimants artificiels, disons-nous, sont basés sur l'emploi d'aciers présentant une grande force coercitive ; c'est le cas des aciers modernes qui contiennent en plus du fer et du carbone qui rend l'aimant trempable, de faibles pour cent d'autres métaux tels que le tungstène, le chrome, le vanadium, etc., qui ont précisément pour effet d'augmenter dans une grande proportion ladite force coercitive.

Susceptibilité magnétique d'un corps. — On appelle ainsi le rapport k qui existe entre l'intensité d'aimantation J de ce corps et l'intensité du champ magnétique H qui l'influence :

$$k = \frac{J}{H};$$

k , qui a la signification d'un simple facteur numérique, est ce qu'on appelle le coefficient de susceptibilité magnétique du corps considéré.

De $k = \frac{J}{H}$ on tire $J = kH$ et cette formule permet d'étudier

expérimentalement la loi suivant laquelle l'aimantation J qu'un corps est susceptible de prendre, varie lorsqu'on fait varier l'intensité H du champ magnétique dans lequel il est placé.

Perméabilité magnétique. — Mais on pourrait aussi procéder d'une autre façon et étudier la loi suivant laquelle le flux de force qui traverse l'unité de section du corps considéré, varie avec l'intensité H du champ qui l'influence.

Or le flux de force qui traverse l'unité de surface d'une surface équipotentielle du champ n'est pas autre chose que l'intensité H de ce champ. On a en effet $\Phi = Hs$ et par conséquent, pour $s = 1$ centimètre carré : $\Phi_1 = H$, en désignant par Φ_1 le flux de force par unité de surface.

Toutefois, dans la partie du champ H qui est occupée par le corps en expérience, le flux de force par unité de surface a varié et est devenu égal à $\mu\Phi_1$. Mais le flux de force par unité de surface est ce que nous avons appelé à page 83 l'induction magnétique \mathfrak{B} ; on peut donc écrire $\mathfrak{B} = \mu\Phi_1 = \mu H$.

Le facteur μ est, comme k tout à l'heure, un coefficient numérique puisqu'il est le rapport de deux flux de force magnétiques. Il dépend à la fois de la nature du corps, de son état et de l'intensité du champ. On lui a donné le nom de coefficient de *perméabilité magnétique*.

Relation entre la susceptibilité et la perméabilité. — Il existe, entre les deux coefficients k et μ d'un corps magnétique, une relation importante qui permet de calculer l'un quand on connaît l'autre et par conséquent de calculer J quand on connaît \mathfrak{B} et réciproquement. Cette relation est :

$$\mu = 1 + 4\pi k,$$

On tire de là :

$$k = \frac{\mu - 1}{4\pi},$$

puis $\mathfrak{B} = \mu H = (1 + 4\pi k) H = H + 4\pi kH,$

et puisque $kH = J$ (voir page 85) :

$$\mathfrak{B} = H + 4\pi J,$$

d'où encore :

$$J = \frac{\mathfrak{B} - H}{4\pi}$$

et $H = \mathfrak{B} - 4\pi J.$ ¹

¹ A. PALAZ, *Cours d'électricité industrielle*, Lausanne.

Courbes d'aimantation. — En portant en abscisses les valeurs variables d'un champ magnétique données en gauss, et en ordonnées les valeurs correspondantes de l'aimantation, on obtient les courbes dites d'aimantation. La figure 50 fait voir quelle en est l'allure pour les principaux métaux magnétiques. A partir d'une valeur déterminée du champ, la valeur de l'aimantation reste à peu près stationnaire, alors même que l'on augmenterait indéfiniment l'intensité du champ. Quand cette valeur d'aimantation

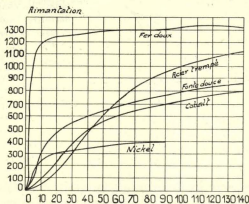


Fig. 50

est atteinte, on dit que le métal magnétique est arrivé à son point de *saturation*. Pour le fer doux, ce point est déjà près d'être atteint avec un champ de 10 gauss. La courbe de l'acier trempé est bien différente de celle du fer doux et il faut porter à près de 140 gauss la valeur du champ pour se rapprocher du point de saturation. La courbe d'aimantation du nickel est remarquable en ce qu'elle ressemble beaucoup à celle du fer doux ; toutefois la valeur de l'aimantation de saturation du nickel est plus de trois fois plus faible que celle du fer doux.¹

Hystérésis. Cycle d'aimantation. — Nous avons vu à page 85 qu'un corps magnétique soumis une première fois à l'influence d'un champ magnétisant, conservait, en vertu de sa force coercitive, un certain degré d'aimantation dit rémanent ou résiduel. Il résulte de là que si l'on fait varier la valeur du champ inducteur dans lequel est placé ce corps, d'abord en l'augmentant, puis en le diminuant, l'aimantation conservera, pour la valeur champ égale à zéro, une certaine valeur OA' (fig. 51) ; cette valeur sera précisément celle du ma-

¹ DEVAUX-CHARBONNEL, *État actuel de la science électrique*.

gnétisme résiduel dans le corps considéré. Si l'on continue à faire décroître le champ, qui prend alors des valeurs négatives, la courbe de l'aimantation correspondante sera elle-même décroissante et pour une certaine valeur du champ $-OF'$, coupera l'axe des x (aimantation nulle). Le champ continuant à décroître, l'aimantation change de sens et prendra une valeur $-A'F''$ pour une valeur du champ $-OF''$. Si à ce moment on fait de nouveau croître le champ, la courbe remontera et repassera par le point A si celui-ci est voisin de la saturation. La courbe $OAA'F'A$ est fermée ; on l'appelle *cycle d'aimantation* ; elle est pratiquement réalisée lorsque le

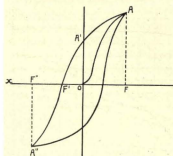


Fig. 51

corps en expérience est soumis à l'action périodiquement variable d'un courant alternatif ; enfin elle nous montre que l'aimantation est toujours en retard sur la force magnétisante, et c'est à ce phénomène qu'on a donné le nom d'*hystérésis*.

Travail mécanique d'hystérésis. — Il faut évidemment dépenser de l'énergie pour faire parcourir au corps un cycle complet d'aimantation. On démontre que cette énergie est proportionnelle à la surface S comprise entre les deux branches extérieures de la courbe fermée de la figure 51. La formule à appliquer est

$$W = \frac{1}{4\pi} \times S.$$

Pratiquement on mesure S au moyen d'un planimètre. W est d'autant plus faible que S est lui-même plus petit ou, ce qui revient au même, que la courbe montante du cycle est plus rapprochée de la courbe descendante (fer très doux).

Steinmetz a donné, pour calculer W , une autre formule qui est :

$$W = n\mathfrak{B}^{1,6},$$

dans laquelle \mathfrak{B} est l'induction magnétique (p. 83), n un coefficient variable avec la nature du corps magnétique et 1,6 un exposant numérique ; n est d'autant plus grand que le métal est plus difficile à aimanter et possède plus de force coercitive ; la formule de Steinmetz donne la valeur de W en ergs par centimètre cube.

Voici les valeurs de n pour quelques variétés de fer, d'acier et de fonte :

Fer très doux	0,002
Tôle de fer très douce et mince	0,0024
Bonne tôle.	0,003
Acier doux fondu recuit	0,005
Acier doux des machines.	0,008
Acier fondu	0,012
Fonte de fer	0,016
Acier fondu trempé	0,025

Dans les machines dynamos génératrices ou réceptrices, les masses de fer en mouvement sont soumises à des cycles magnétiques nombreux et rapides ; ceux-ci occasionnent, sous forme de chaleur, des pertes d'énergie qui sont d'autant plus grandes que les masses sont plus compactes et moins perméables.

Champ magnétique produit par un courant électrique. — Nous avons vu à la page 81 comment un aimant crée autour de lui un champ magnétique. Les aimants ne sont pas seuls à jouir de cette propriété ; les courants électriques la possèdent aussi.

Un fil conducteur ab (fig. 52) traversé par un courant électrique attire la limaille de fer et produit, selon le sens de son courant une attraction ou une répulsion sur un second fil également parcouru par un courant : il existe ainsi autour de lui un

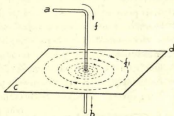


Fig. 52

champ magnétique et des lignes de force qui peuvent être rendues visibles au moyen de limaille de fer projetée sur un plan cd perpendiculaire à ab . Les grains de limaille se disposent en lignes circulaires concentriques à ab ; le sens de circulation de ces lignes est indiqué par la flèche f' ; il est celui dans lequel il faudrait tourner un tire-bouchon pour le faire progresser dans le sens de circulation du courant électrique. Sur la figure 52, le courant ab étant descendant, le sens de circulation des lignes de force, vues d'en haut, est le même que celui des aiguilles d'une montre. Si l'on renversait le sens du courant de

manière que celui-ci devienne montant, les mêmes lignes de force, vues d'en haut, auraient un sens de circulation qui serait l'inverse de celui des aiguilles d'une montre.

La forme générale du cortège des lignes de force circulant autour du

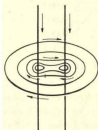


Fig. 53

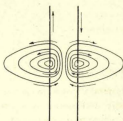


Fig. 54

au fil *ab* lui était parallèle, les grains de limaille matérialisant les lignes de force, se présenteraient sous l'aspect d'une *arête de poisson*. Deux courants voisins de même sens (fig. 53) s'attirent mutuellement et leurs cortèges de lignes de force tendent à se fondre en un seul en prenant l'aspect d'un corps prismatique à section ellipsoïdale.

Deux courants voisins de sens inverse, se repoussent et leurs cortèges de lignes de force aussi (fig. 54).

Solénoïde. — Des deux remarques qui précèdent, on déduit celle-ci : un fil tel que *ab* (fig. 55) porteur d'un courant (le même sur toute la longueur de *ab*) et enroulé un grand nombre de fois en hélice, crée un cortège de lignes de force magnétiques qui sont parallèles et

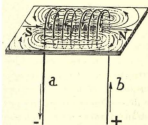


Fig. 55

très denses à l'intérieur de l'hélice et qui prennent, à l'extérieur de celle-ci, la forme de courbes régulières dont la densité diminue à mesure qu'on les considère plus loin de l'axe de l'hélice.

On constate ainsi que l'ensemble de ces lignes a exactement le même aspect que celles du barreau aimanté de la figure 47, en sorte que notre fil en hélice, auquel on donne le nom de

solénoïde, se comporte comme un aimant droit (fig. 56). Si l'on suspend un solénoïde par le milieu de telle manière qu'il puisse tourner

autour d'un axe vertical, il prend, comme l'aiguille aimantée, la direction nord-sud, et ses lignes de force sortent de l'extrémité nord et rentrent par l'extrémité sud.

Force magnétique à l'intérieur d'un solénoïde. — On la calcule au moyen de la formule suivante :

$$F = \frac{4\pi NI}{l}$$

dans laquelle N est le nombre de tours de fil de l'hélice, I l'intensité du courant qui le parcourt et l la longueur du solénoïde. F nous donne aussi la valeur du champ à l'intérieur d'un solénoïde droit, dans le cas où sa longueur est relativement grande par rapport à son diamètre, et où l'on peut admettre que le flux des lignes de force est à peu près le même sur toute la longueur l .

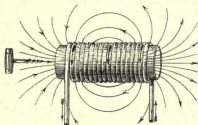


Fig. 56

Flux d'induction d'un solénoïde.

— Nous l'appellerons Φ comme le flux de force d'un aimant (p. 83) et considérerons d'abord le cas où l'intérieur du tube solénoïdal est rempli d'air. Il s'agit de calculer la valeur de Φ .

Nous avons vu à page 82 que le circuit magnétique parcouru par le flux Φ pouvait être assimilé à un circuit conducteur parcouru par un courant électrique I . Φ devient ainsi l'analogue de I .

Or d'après la loi d'Ohm $\left(I = \frac{E}{R}\right)$, I est proportionnel à la force électromotrice qui est la cause du courant et inversement proportionnel à la résistance du circuit électrique.

De même en matière de magnétisme, on constate que l'on peut écrire :

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathfrak{R}}$$

formule dans laquelle \mathcal{F} (majuscule anglaise) représente la force qui provoque la circulation du flux et à laquelle on donne le nom de *force magnétomotrice*, tandis que \mathfrak{R} (majuscule anglaise) n'est autre chose que la *résistance* qu'offre le circuit magnétique à la circulation du flux de force Φ et à laquelle on a donné le nom de *réductance*.

Force magnétomotrice. — Il saute aux yeux que cette force est d'autant plus grande que le courant I qui parcourt le fil du solénoïde est plus intense et que le nombre des spires ainsi parcourues par I est lui-même plus élevé. On obtient la valeur de \mathcal{F} en unités C. G. S. au moyen de la formule :

$$\mathcal{F} = \frac{4\pi NI}{10} = 1,25 NI.$$

Le produit NI est ce qu'on appelle les *ampères-tours*.

Dans un solénoïde où l'on aurait $N = 150$ spires, $I = 6$ ampères, la force magnétomotrice serait :

$$\mathcal{F} = 1,25 \times 150 \times 6 = 1125 \text{ unités C. G. S.}$$

L'unité C. G. S. de force magnétomotrice a reçu le nom de *gilbert*.

On a donc, puisque I exprimé en ampères vaut $\frac{1}{10}$ d'unité théorique d'intensité (p. 43) :

$$1 \text{ gilbert} = \frac{10}{4\pi} \text{ ampère-tour et réciproquement}$$

$$1 \text{ ampère-tour} = \frac{4\pi}{10} \text{ gilbert.}$$

Réductance. — La formule permettant de calculer la réductance \mathcal{R} d'un circuit magnétique est de même forme que celle qui nous a donné la résistance R d'un circuit électrique ; elle s'écrit :

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu s},$$

l étant la longueur du circuit magnétique mesurée dans la direction de circulation des lignes de force, s sa section mesurée perpendiculairement à cette direction, enfin μ le coefficient de perméabilité du milieu traversé par le flux de force (voir p. 86).

L'unité C. G. S. de réductance est l'*oersted*.

De la formule $\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}$ qui donne le flux de force en fonction de la force magnétomotrice et de la réductance, on tire successivement :

$$\mathcal{F} = \Phi \mathcal{R} \text{ et } \mathcal{R} = \frac{\mathcal{F}}{\Phi}$$

comme on le fait dans le cas de la loi d'Ohm pour les valeurs de I , de E et de R .

Application. Calculer le flux de force qui circule dans l'inté-

rieur d'un solénoïde droit ayant 80 centimètres de longueur, 4 centimètres carrés de section et 1000 spires parcourues par un courant de trois ampères ; on aura :

Force magnétomotrice $\mathcal{F} = 1,25 \text{ NI} = 1,25 \times 1000 \times 3 = 3750$ gilberts.

$$\text{Réductance } \mathcal{R} = \frac{l}{\mu s} = \frac{l}{s} = \frac{80}{4} = 20 \text{ oersteds}$$

et enfin :

$$\text{Flux de force } \Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} = \frac{3750}{20} = 187,5 \text{ maxwells.}$$

Remarque 1. Dans le calcul de \mathcal{R} , le coefficient μ a été pris égal à l'unité parce que l'on admet que pour toutes les substances non magnétiques, telles que l'air, la soie, le coton, le bois, le cuivre, le laiton, etc., le coefficient de perméabilité est le même et précisément égal à 1 ; or l'intérieur de notre solénoïde est supposé rempli d'air.

Remarque 2. Le flux de 187,5 maxwells calculé ci-dessus est un peu trop fort parce que dans la réductance de 20 oersteds n'est pas comprise la résistance magnétique qu'oppose à la circulation de ce flux la partie du circuit que les lignes de force parcourent à l'extérieur du solénoïde ; toutefois la section dans cette partie peut être considérée comme infiniment grande et la réductance correspondante comme nulle. On raisonne ici comme dans le cas d'un circuit électrique dans lequel la terre constitue le chemin de retour du courant à résistance électrique négligeable.

Solénoïde annulaire. — Si l'on courbe un solénoïde droit en forme d'anneau circulaire de telle manière que les deux extrémités se rejoignent comme l'indique la figure 57, le cortège des lignes de force magnétiques créé par la circulation d'un courant dans les spires, est situé tout entier dans l'intérieur du solénoïde ; on a alors ce qu'on appelle un *circuit magnétique fermé* dont la réductance est donnée, tout entière aussi, par la formule

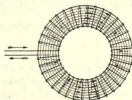


Fig. 57

$$\mathcal{R} = \frac{l}{s},$$

l n'étant autre chose que le développement de la circonférence moyenne de l'anneau. Si ce développement est, en longueur, précisément égal aux 80 centimètres du solénoïde droit de l'exemple

précédent, la réluctance de 20 oersteds et le flux de 187,5 maxwells, calculés tout à l'heure, donneront *exactement* les valeurs de \mathfrak{R} et de Φ .

Solénoïde à noyau de fer doux. — Supposons maintenant que l'intérieur du solénoïde annulaire de la figure 57 soit rempli non pas d'air (ou de toute autre substance ayant l'unité comme coefficient de perméabilité μ), mais bien de fer doux : on constatera alors que le passage du courant de 3 ampères dans les 1000 spires de l'hélice donne naissance à un flux de force Φ_1 qui est considérablement plus intense que celui de 187,5 maxwells obtenu tout à l'heure. Comme les ampères-tours NI sont restés les mêmes, ce n'est évidemment pas la force magnétomotrice \mathcal{F} qui a augmenté de valeur ; elle est restée égale à 3750 gilberts ; c'est donc forcément la réluctance \mathfrak{R} du circuit magnétique qui a diminué. Cette réluctance en effet, calculée au moyen de la formule complète

$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu s}$ de la page 93 dans laquelle le coefficient de perméabilité μ est plus grand que l'unité, devient plus petite du fait de la présence de ce dernier au diviseur de la valeur de \mathfrak{R} .

De ce qui précède, il résulte que le coefficient μ du fer doux n'est autre chose que le rapport des deux flux Φ_1 et Φ qui parcourent l'intérieur d'un solénoïde annulaire donné, selon que cet intérieur est occupé par du fer ou de l'air.

De l'analogie ou identité algébrique qui existe entre les deux formules donnant d'une part la valeur $R = \frac{aL}{s}$ de la résistance électrique et d'autre part celle de la résistance magnétique ou réluctance $\mathfrak{R} = \frac{\varrho l}{s}$ (en faisant dans cette dernière $\varrho = \frac{1}{\mu}$), il ne faudrait pas conclure à l'identité d'influence des coefficients a et ϱ .

Le premier, a , ne dépend en effet que de la nature du corps conducteur en expérience, tandis que le second, ϱ , dépend non seulement de la nature de la substance qui constitue le circuit magnétique, mais encore du nombre plus ou moins grand des lignes de force qui parcourent ce circuit, autrement dit de ce que nous avons appelé à la page 83 *l'induction magnétique* \mathfrak{B} , (nombre des lignes de force par unité de surface de section traversée)¹. Cette dernière remarque

¹ Si le coefficient a de résistance électrique dépendait non seulement de la nature du conducteur, mais encore et en plus de la valeur plus ou moins grande de l'intensité du courant I , on aurait, en électricité, l'analogie de l'influence de \mathfrak{B} sur ϱ et par conséquent sur μ , en magnétisme.

est la conséquence directe de l'allure de la courbe d'aimantation du fer doux étudiée à page 87 en regard de la figure 50, allure qui montre que plus l'aimantation du fer est intense ou, ce qui revient au même, plus le flux de force magnétique qui le traverse déjà est dense et se rapproche du point de saturation, plus aussi doit être augmentée la force magnétisante — que cette force soit celle d'un champ magnétique inducteur proprement dit H , ou ce que nous venons d'appeler la force magnétomotrice \mathcal{F} (créée par un courant) — pour introduire (ou mieux dit pour forcer à entrer) dans le circuit magnétique considéré, de nouvelles lignes de force.

Le tableau suivant fait voir comment les coefficients de perméabilité moyens du fer et de la fonte grise varient pour diverses inductions :

Inductions	Coefficients de perméabilité	
	Fer forgé recuit	Fonte grise
4000	800
5000	2500	500
6000	2459	279
7000	2439	166
8000	2374	100
9000	2250	71
10000	2000	53
11000	1692	37
12000	1412	
13000	1083	
14000	823	
15000	526	
16000	308	
17000	161	
18000	90	
19000	54	

Le tableau précédent ¹ montre que plus l'induction \mathcal{B} augmente, plus les coefficients de perméabilité μ diminuent. Ceux-ci tendent ainsi à se rapprocher de l'unité qui est le coefficient de perméabilité des corps non-magnétiques (p. 93, remarque 1).

Chez les corps diamagnétiques (p. 85), le coefficient de perméa-

¹ Emprunté à l'ouvrage de M. C. LEBLOIS, *l'Électricité industrielle* (Dela-grave, Paris), où sont résumés les résultats des travaux de divers expérimentateurs.

bilité μ est inférieur à l'unité ; ces corps, en effet, sont moins perméables aux lignes de force que l'air lui-même. Les deux figures 58

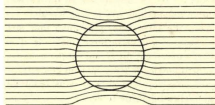


Fig. 58

et alors les lignes de force du champ tendent à se serrer pour passer en plus grand nombre dans le milieu plus perméable que l'air. Dans le second cas, μ est plus petit que l'unité, et alors les lignes de

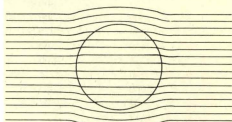


Fig. 59

force tendent à s'écarter les unes des autres en passant à travers le corps diamagnétique qui est moins perméable que l'air.

Electro-aimants.

— Un électro-aimant n'est autre chose qu'un noyau

de fer doux (droit ou le plus souvent recourbé en forme de fer à cheval) enveloppé d'un ou plusieurs solénoïdes dont les spires sont

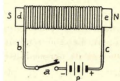


Fig. 60

parcourues ou non par un courant électrique. La figure 60 représente un électro-aimant droit ; un interrupteur à main ou automatique *a* placé sur le circuit électrique du fil solénoïdal *bc* et d'une source de courant *p*, ouvre et ferme ce circuit. Lorsque le courant de *p* circule (interrupteur *a* fermé) un certain flux de force magnétique circule à son tour dans le noyau de fer *de* et l'aimante d'autant plus fortement que le courant produit par *p* est

plus intense, que le nombre des spires *bc* est plus élevé et enfin que le fer du noyau *de* est plus perméable.

Cette aimantation, qui disparaît dès que le courant de p cesse (interrupteur a ouvert), a pour conséquence la présence aux deux extrémités du noyau de de deux pôles magnétiques de nom contraire N et S qui sont identiques à ceux d'un aimant artificiel droit (fig. 47) et dont la nature nord ou sud dépend du sens de circulation des lignes de force dans le noyau de et par conséquent du sens de circulation du courant électrique lui-même dans le fil $pcba$.

La caractéristique essentielle d'un électro-aimant est donc d'être un aimant temporaire dont les pôles peuvent être à volonté présents, absents ou inversés. La figure 61 représente un électro-aimant en forme de fer à cheval dont le fil solénoïdal réparti également sur deux bobines est com-

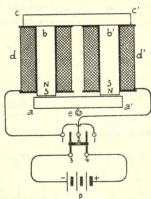


Fig. 61

mandé par un commutateur-inverseur de courant 1-2-3-4 ; selon que les lames conductrices mobiles de cet inverseur relient 1 avec 3 et 2 avec 4, ou relient 1 avec 4 et 2 avec 3, le courant de p change de sens dans le solénoïde, et les pôles magnétiques de nom, aux extrémités du noyau de fer. Le fil reliant entre elles les deux bobines doit être disposé comme l'indique la figure 62, c'est-à-dire de telle façon que l'induction produite par chacune d'elles soit de même sens que celle que produit l'autre.

On appelle *armature* d'un électro-aimant une pièce en fer doux (ou en acier aimanté) qui est soumise à l'influence magnétique temporaire du flux de force que développe le passage du courant dans le fil solénoïdal.

Lorsque cette armature est en fer doux et a une forme prismatique semblable, par exemple, à la pièce aa' de la figure 61, qui s'applique exactement sur les faces polaires N et S , en les débordant quelque peu de part et d'autre, elle constitue avec les jambes bb' et la pièce transversale cc' , qu'on appelle *culasse*, un circuit magnétique fermé

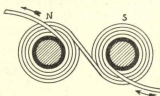


Fig. 62

analogue à celui du solénoïde annulaire à noyau de fer doux de la figure 57.

Mais ici le flux de force Φ qui circule dans le circuit magnétique homogène $baa'b'c'cb$, lorsque le courant passe dans les bobines dd' , a pour effet d'attirer et de coller fortement l'armature aa' contre les extrémités polaires N et S des jambes b et b' , si bien que l'on peut suspendre au crochet e un poids qui est d'autant plus lourd que le flux Φ est lui-même plus intense.

On appelle *force portante* d'un électro-aimant donné, le poids maximum que son armature collée peut supporter à la limite d'arrachement pour un courant I d'intensité donnée.

Nous avons vu à la page 92 comment on calcule au moyen de la formule générale

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathfrak{R}} = \frac{1,25NI}{\frac{l}{\mu s}}$$

le flux Φ en fonction de la force magnétomotrice \mathcal{F} (ampères-tours NI) et de la réluctance \mathfrak{R} d'un circuit de longueur l , de section moyenne s et de coefficient de perméabilité μ . Toutefois cette formule n'est pas d'une application simple aux électro-aimants, parce que le coefficient μ dont dépend Φ , varie lui-même selon que Φ est plus ou moins intense (page 95).

Lors donc qu'il s'agit de résoudre le problème général qui consiste à déterminer les dimensions et les ampères-tours que doit recevoir un électro-aimant pour avoir une force portante donnée, on est obligé de procéder par voie de tâtonnements. Mais il faut auparavant se poser le problème préliminaire suivant :

Le noyau en fer doux d'un électro-aimant à armature collée étant donné en dimensions l et s , ainsi que le flux Φ qui doit le traverser, calculer la valeur des ampères-tours capable de produire ce flux.

Soit, par exemple, le noyau d'électro-aimant représenté dans la figure 63, et posons $\Phi = 256\,000$ maxwells.

Admettons qu'on ait en outre : longueur totale l_i du circuit magnétique

$$l_i = l_c + 2l_j + l_a = 60 \text{ cm.}$$

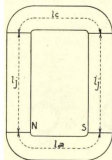


Fig. 63

Supposons que la section s de chacune des trois parties (culasse c , jambe j et armature a) du circuit soit uniforme et égale à 16 centimètres carrés.

Nous savons que pour trouver, sur le tableau de la page 95, le coefficient de perméabilité μ , il faut connaître la valeur de l'induction \mathfrak{B} qui correspond au flux donné de 256 000 maxwells. Or \mathfrak{B} est le flux par centimètre carré de section ; on a donc :

$$\mathfrak{B} = \frac{\Phi}{s} = \frac{256\,000}{16} = 16\,000 \text{ unités d'induction.}$$

Cherchant à la page 95 dans la colonne intitulée fer forgé recuit, la valeur de μ qui correspond à une induction \mathfrak{B} de 16000, on trouve 308.

Nous avons alors tout ce qu'il faut pour calculer la réluctance \mathfrak{R} de notre noyau d'électro-aimant. En effet :

$$\mathfrak{R} = \frac{l_t}{\mu s} = \frac{60}{308 \times 16} = 0,0121 \text{ oersted.}$$

De la formule $\Phi = \frac{\mathfrak{F}}{\mathfrak{R}}$ nous tirons

$$\mathfrak{F} = \Phi \mathfrak{R}$$

et, dans notre cas :

$$1,25 \text{ NI} = 256\,000 \times 0,0121$$

et encore :

$$\text{NI} = \frac{256\,000 \times 0,0121}{1,25} = 2478 \text{ ampères-tours.}$$

En admettant que l'intensité I du courant soit choisie à 5 ampères, on aura comme nombre de tours ou spires à mettre sur les deux bobines de l'électro-aimant en fer à cheval :

$$N = \frac{2478}{5} = 496 \text{ en nombre rond,}$$

soit : $\frac{496}{2} = 248$ spires par bobine.

Noyau d'électro-aimant non-homogène. — Dans le problème préliminaire résolu ci-dessus, on a admis que les diverses parties du noyau étaient toutes de même nature (fer doux) et de même section.

Tel n'est pas toujours le cas et il arrive que sur le parcours du flux, le noyau soit constitué de corps de diverses natures dont chacun a sa longueur l , sa section s et son coefficient μ . Il faut alors généraliser la formule

$$\mathcal{F} = \Phi \mathcal{R} = \Phi \frac{l}{\mu s},$$

en écrivant :

$$\mathcal{F} = \Sigma(\Phi \mathcal{R}) = \Phi \left(\frac{l_1}{\mu_1 s_1} + \frac{l_2}{\mu_2 s_2} + \dots + \frac{l_n}{\mu_n s_n} \right) \text{ gilberts.}$$

L'un des facteurs $\frac{l}{\mu s}$ pourra même être celui qui correspond à une couche d'air interposée, par exemple, entre l'armature aa' et les surfaces polaires N et S , et alors on a là ce qu'on appelle un *entrefer*.

Cela dit, calculons rapidement la nouvelle valeur que prend le chiffre de 2478 ampères-tours de tout à l'heure, lorsqu'on éloigne et maintient l'armature aa' de la figure 63 à une distance des pôles égale à deux millimètres (0,2 cm.).

On a alors évidemment à ajouter à la réluctance de 0,0121 oersted qui correspond au cas de l'armature collée, la réluctance additionnelle $\frac{l}{\mu s}$ de la double couche d'air interposée entre l'armature et les pôles. Mais nous avons vu à la page 93 que pour l'air, μ est égal à l'unité ; on aura donc comme réluctance de notre entrefer :

$$\frac{l}{s} = 2 \times \frac{0,2}{16} = 0,025 \text{ oersted,}$$

et alors NI devient :

$$NI = \frac{\Phi(0,0121+0,025)}{1,25} = \frac{256\,000(0,0121+0,025)}{1,25} = 7598 \text{ ampères-tours,}$$

soit un chiffre qui est plus de trois fois plus élevé que celui du circuit sans entrefer.

Dispersion magnétique. — Toutefois, dans la réalité pratique, le chiffre de 7598 ampères-tours se révélerait encore trop faible et ne permettrait pas d'obtenir la totalité du flux de 256 000 maxwells ; il faudrait l'augmenter d'une certaine quantité destinée à compenser les pertes dues à ce qu'on appelle la *dispersion magnétique*. C'est la

présence même d'un ou de plusieurs entrefers qui est la cause de ces pertes. En effet, grâce à la grande réluctance que possèdent les couches d'air qui remplissent les entrefers, les lignes de force magnétiques ne suivent pas toutes le circuit total ; une notable partie d'entre elles s'échappe dans l'air environnant, parce que ce dernier, en vertu de sa grande section, leur offre une réluctance qui, dans certaines conditions données, est plus faible que celle des entrefers. On comprend dès lors facilement que plus l'épaisseur de ces entrefers est grande, plus la dispersion magnétique est elle-même considérable, et plus aussi par conséquent il faut augmenter les maxwells pour compenser la perte en lignes de force due à cette dispersion ; celle-ci dépend en outre de la forme plus ou moins favorable des surfaces qui limitent les entrefers ; les lignes de force, en effet, s'échappent plus facilement par les arêtes vives et les pointes que par les plans ou les arrondis.

Force portante des électro-aimants. — Cette force P , telle qu'elle a été définie à la page 108, permet de comparer entre eux les électro-aimants. Les formules suivantes, dues à Clerk Maxwell, donnent sa valeur en fonction de l'induction \mathfrak{B} et de la section s du circuit :

$$P \text{ (en dynes)} = \frac{\mathfrak{B}^2 s}{8\pi}.$$

$$P \text{ (en grammes-poids)} = \frac{\mathfrak{B}^2 s}{8\pi \times 981}.$$

$$P \text{ (en kilogrammes)} = \frac{\mathfrak{B}^2 s}{8\pi \times 981\,000}.$$

Lorsque l'électro-aimant et son armature en fer doux sont disposés de telle façon que les deux pôles N et S agissent simultanément sur cette armature, il faut doubler la section s et alors la formule donnant P en kilogrammes devient :

$$P \text{ kil.} = \frac{2s\mathfrak{B}^2}{8\pi \times 981\,000}.$$

On voit ainsi que P ne dépend que de la section s du noyau de fer et de l'induction \mathfrak{B} , ce qui permet d'établir le tableau suivant au moyen duquel on trouve les valeurs de l'attraction en kilogrammes par centimètre carré de section, pour différentes valeurs de l'induction :

Induction \mathfrak{B}	Force portante en kil. par centimètre carré	Induction \mathfrak{B}	Force portante en kil. par centimètre carré
1 000	0,041	11 000	4,907
2 000	0,162	12 000	5,841
3 000	0,363	13 000	6,855
4 000	0,649	14 000	7,550
5 000	1,014	15 000	9,124
6 000	1,460	16 000	10,390
7 000	1,987	17 000	11,720
8 000	2,596	18 000	13,140
9 000	3,286	19 000	14,630
10 000	4,056	20 000	16,230

Dans la pratique, on ne dépasse guère l'induction de 16 000 unités, à laquelle correspond une force portante de 10 kilogrammes environ par centimètre carré de section.

Exemple de calcul d'un électro-aimant. — Supposons qu'il s'agisse de construire un électro-aimant en forme de fer à cheval dont l'armature collée soit capable de supporter un poids maximum de 400 kilogrammes.

De la formule de Clerk Maxwell $P \text{ kil.} = \frac{2s\mathfrak{B}^2}{8\pi \times 981\,000}$, on tire comme suit la valeur que devra avoir la section s du noyau :

$$s = \frac{P \times 8\pi \times 981\,000}{2\mathfrak{B}^2}$$

En choisissant $\mathfrak{B} = 16\,000$ unités, il vient :

$$s = \frac{400 \times 8\pi \times 981\,000}{2 \times 16\,000^2} = 19,26 \text{ centimètres carrés,}$$

surface qui, pour un noyau rond, correspond à environ 5 centimètres de diamètre (jambes de l'électro).

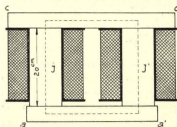


Fig. 64

La section moyenne du noyau une fois déterminée, on se donne, en vue d'un calcul de première approximation (p. 98), la longueur totale du circuit magnétique fermé, soit le développement l de la ligne médiane $aa'jj'cc'$ (fig. 64) de ce circuit.

Faisons $l = 100$ centimètres et calculons la réluctance \mathfrak{R} correspondante. On aura :

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{s\mu} = \frac{100}{19,26 \times 308} = 0,017 \text{ oersted},$$

car μ , selon le tableau de la page 95, est égal à 308 lorsque l'induction choisie est de 16 000 gauss.

D'autre part, nous savons que le flux Φ qui correspond à $\mathfrak{R} = 16\,000$ et à $s = 19,26$, est (p. 83) :

$$\Phi = \mathfrak{R}s = 19,26 \times 16\,000 = 308\,160 \text{ maxwells.}$$

En outre, nous avons vu que la force magnétomotrice capable d'engendrer un flux Φ à travers une réluctance \mathfrak{R} a pour valeur (p. 92) :

$$\mathcal{F} = \Phi\mathfrak{R} = 308\,160 \times 0,017 = 5238,72 \text{ gilberts.}$$

Mais \mathcal{F} elle-même est égale à 1,25 NI. On peut donc écrire :

$$1,25 \text{ NI} = 5238,72$$

et
$$NI = \frac{5238,72}{1,25} = 4190 \text{ ampères-tours.}$$

Pour une densité choisie I de 5 ampères on aura :

$$N = \frac{4190}{5} = 840 \text{ spires}$$

à mettre sur les deux jambes de l'électro-aimant, ce qui correspond à 420 spires par jambe.

Notre courant de 5 ampères nécessite une section de fil de cuivre nu de $\frac{5}{3} = 1,65$ millimètres carrés (il ne faut pas dépasser, en effet, une densité de 3 ampères par millimètre carré, si l'on veut éviter que, par la circulation ininterrompue du courant, le fil isolé de l'enroulement ne s'échauffe jusqu'à compromettre son isolation).

Or 1,65 mm. carré de section ronde correspond à un diamètre de fil nu de 1,45 mm. Admettons que le diamètre total du fil, isolation comprise, soit de 2 mm. D'après la figure 64, la longueur de chacune des deux jambes de l'électro est de 20 centimètres ; on y pourra donc enrouler 100 spires jointives de notre fil isolé de 2 mm. de diamètre et alors les 420 spires calculées ci-dessus occuperont $\frac{420}{100} = 4,2$ couches de 100 spires chacune, chiffre que nous pouvons arrondir à 4 ou 5 (en

augmentant ou diminuant quelque peu l'ampérage ; on maintient néanmoins Φ à la valeur calculée des 308 160 maxwells).

L'épaisseur totale de ces 4 ou 5 couches de fil isolé sera respectivement de 8 ou 10 millimètres ; en doublant ces derniers chiffres, on aura l'espace occupé par la portion des deux enroulements qui est située entre les jambes de l'électro. On voit alors immédiatement que cet espace est trop petit comparé à la distance qui existe entre les jambes, que ces jambes elles-mêmes, aussi bien que la culasse et l'armature, sont inutilement longues et que l'on peut en conséquence réduire avec profit la longueur l du circuit magnétique et sa réluctance.

On recommencera alors le calcul des ampères-tours adaptés à cette nouvelle valeur de l et ainsi de suite en faisant varier l soit dans un sens, soit dans l'autre, jusqu'à ce qu'on obtienne un électro-aimant *économique*, c'est-à-dire ayant des dimensions aussi petites que possible par rapport à la force portante prescrite de 400 kilos.

L'exemple de calcul d'un électro-aimant à armature collée, tel que nous venons de le donner, ne présente pas grand intérêt en horlogerie électrique où les électro-aimants sont utilisés en vue d'une action à distance des pôles sur une armature mobile. Toutefois, même ici, la valeur calculée de la force portante a une certaine utilité, car on en peut déduire approximativement les valeurs de la force attractive variable à laquelle est soumise une armature mobile, aux différents points de sa course. Les deux moments de cette course qui importent le plus sont ceux du départ et de l'arrivée ; le premier correspond à l'entrefer maximum et le second à l'entrefer minimum pouvant exister entre pôles et armature.

Nous avons vu à page 100 comment la présence d'un ou plusieurs entrefers a pour effet d'augmenter dans une grande proportion la réluctance du circuit magnétique et de diminuer d'autant la valeur du flux de force Φ . Ce flux est en outre fortement influencé par la dispersion magnétique qui croît elle-même en raison de l'épaisseur plus ou moins grande des mêmes entrefers. Le professeur Bouasse résume comme suit au paragraphe 84, Tome troisième, de son Cours de Physique, les règles *qualitatives* (ainsi qu'il les appelle) qu'un constructeur d'électro-aimants peut substituer à celles quantitatives que donnerait le calcul des phénomènes, si ce calcul était possible.

La loi générale est celle-ci : les corps se déplacent de manière que le circuit magnétique ait le moins de réluctance possible.

Cette loi comporte trois corollaires, dont chacun correspond à l'un des trois facteurs l (longueur), s (section) et μ (perméabilité) donnant la valeur de la réluctance \mathfrak{R} , et qui sont :

1^o les lignes de force tendent à se raccourcir comme si elles étaient tendues ;

2^o elles tendent à s'écarter comme si elles se repoussaient ;

3^o elles tendent à traverser le milieu le plus perméable.

Les figures 65, 66, 67, 68 et 69 illustrent suffisamment ce qui précède pour nous dispenser d'entrer ici dans de longs développements.

Les figures 65 et 66 font voir les attractions et répulsions qui se produisent entre les

cortèges de lignes de force de deux barreaux aimantés droits, selon que ce sont leurs pôles de même nom ou de noms contraires qui réagissent l'un sur l'autre.

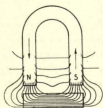


Fig. 67

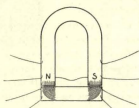


Fig. 68

Dans la figure 67, on voit qu'en raison de la grande perméabilité du fer, la plupart des lignes de force émanant des pôles N et S , franchissent l'entrefer pour passer dans l'armature aa' ; en outre, comme elles tendent à se raccourcir, elles auront pour effet de plaquer aa' contre N et S (fig. 68). Enfin, dans la figure 69, l'armature qui est représentée sous la forme d'un barreau de fer doux mobile autour d'un axe perpendiculaire au plan du papier, tendra à se placer parallèlement à la ligne des pôles N et S .

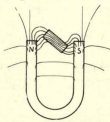


Fig. 69

L'électro-aimant en horlogerie électrique. — Il ne peut être question de refaire, après tant d'autres auteurs, une revue des nombreuses dispositions d'électro-aimants qui ont été imaginées et appliquées jusqu'ici. On consultera avec profit, à ce sujet : DU MONCEL, Tomes 2 et 4 de son *Exposé des applications de l'électricité* ; SYLVANUS P. THOMPSON, *L'électro-aimant et l'électro-mécanique* ; BOUASSE, *Cours de physique*, tome III, etc. Nous nous bornerons à constater ici combien la théorie moderne du flux de force magnétique a contribué à éclaircir les idées dans un domaine où les erreurs de faits et d'interprétations ont été, autrefois, particulièrement nombreuses.

Nous aurons d'ailleurs de multiples occasions de revenir, au cours de la partie pratique de cet ouvrage, sur différentes formes d'électro-aimants et d'armatures que des inventeurs, parfois ingénieux, ont proposées, avec plus ou moins de succès, en vue des applications de cet organe essentiel à l'électrochronométrie. Avant de terminer la section 1^o du présent chapitre IV, consacrée au magnétisme et à l'électromagnétisme, nous attirerons l'attention du lecteur sur certaines particularités de fonctionnement des électro-aimants à armatures mobiles.

L'électro-aimant à armature mobile n'est pas autre chose qu'un transformateur d'énergie électrique en énergie mécanique. Quand celle-ci doit être employée à déplacer sur un cadran circulaire gradué une paire d'aiguilles légères bien équilibrées sur leurs axes et protégées en outre par un verre transparent (cas qui se présente le plus fréquemment dans la pratique), la résistance mécanique qu'opposent ces aiguilles et leur minuterie à la force électromagnétique de l'armature en mouvement, est extrêmement minime, quelques grammes seulement lorsque le diamètre du cadran ne dépasse pas 20 centimètres et que par conséquent la pointe de l'aiguille des minutes (ou des secondes) n'a à parcourir qu'un centimètre environ mesuré sur le cercle des minutes (ou des secondes).

Admettons, pour fixer les idées, que la valeur de la pression que cette pointe d'aiguille exerce sur un dynamomètre approprié, au moment où elle effectue cette course d'un centimètre, soit de 10 grammes ; le travail mécanique correspondant sera par définition :

$$W = 10 \text{ grammes} \times 1 \text{ centimètre}$$

soit 10 grammes-centimètres.

Or le gramme-centimètre est $1000 \times 100 = 100\,000$ fois plus petit que le kilogrammètre qui vaut lui-même 9,81 joules (page 42). Un gramme-centimètre équivaut ainsi à

$$\frac{9,81}{100\,000} = 0,0000981 \text{ joule}$$

ou, en arrondissant, à un dix-millième de joule, en sorte que nos 10 grammes-centimètres de tout à l'heure valent approximativement un millième de joule. Telle est la valeur du travail mécanique absorbé *utilement* par l'horloge électrique en action.

Voyons maintenant quelle est la valeur du travail mécanique qu'un électro-aimant en fer à cheval du type classique à armature plate et à ressort antagoniste tel qu'il est représenté dans la figure 70 ci-contre, absorbe à ses bornes d'entrée sous forme de courant, pour effectuer le travail utile ci-dessus de un millième de joule.

Remarquons tout d'abord qu'une partie considérable de l'énergie contenue dans le courant est employée à vaincre la tension du ressort antagoniste J qui doit ramener l'armature d dans la position

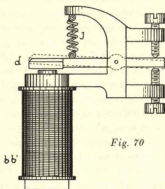


Fig. 70

non-attrée, aussitôt que le courant excitateur cesse de circuler dans les bobines bb' de l'électro. Or, de deux choses l'une : ou bien c'est le mouvement d'*aller* de l'armature qui provoque le déplacement de la minuterie et des aiguilles, et alors leur résistance mécanique s'ajoute à celle, simultanée, de ce ressort ; ou bien, c'est le mouvement de *retour* de l'armature qui produit ce déplacement, et alors le ressort J doit être assez fort pour faire face, en se détendant, et à la résistance mécanique née de ce déplacement et à celle parfois considérable que l'armature éprouve du fait du magnétisme rémanent de l'électro (p. 85). En tout état de cause, la présence de l'organe antagoniste, qu'il soit un ressort ou un contrepoids, oblige le constructeur à donner au courant d'entrée une énergie supérieure à celle qui serait strictement suffisante pour mouvoir les aiguilles.

Mais il y a d'autres facteurs encore qui interviennent nécessairement dans la pratique et qui engagent l'horloger-électricien à exa-

gérer l'écart entre l'énergie électrique et les résistances mécaniques à vaincre : ces résistances sont bien loin d'être *constantes* ; elles varient, les unes avec le temps (épaississement des huiles, saleté croissante des rouages, etc.), les autres avec la température (qui modifie la force de l'organe antagoniste).

D'autre part, l'énergie contenue dans le courant à son entrée dans les bobines de l'électro, est presque toujours soumise elle-même à des fluctuations provenant soit d'un générateur infidèle, soit d'un interrupteur défectueux, soit enfin de fils à isolation ou à conductibilité imparfaites.

Des remarques qui précèdent, il résulte que ce qu'on appelle le *coefficient de sûreté de marche* de l'horloge, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie du courant introduit et l'énergie qui est strictement nécessaire au déplacement des aiguilles, lorsque le rouage de l'horloge est à l'état de neuf, que ce coefficient, disons-nous, doit être, dans la pratique, relativement élevé.

C'est bien ce qui a lieu en effet. C'est ainsi que certains constructeurs de réceptrices électriques, non encore ralliés à l'idée de la supériorité des émissions de courant alternées sur celles toujours de même sens, n'hésitent pas à munir leurs produits d'électro-aimants du type classique dont la résistance d'enroulement est souvent de 40 ohms et dans lesquels ils veulent qu'on lance un courant moyen de 2 volts. Or d'après la loi d'Ohm, ces deux chiffres correspondent à une intensité de 0,05 ampère et à une puissance (p. 25) de $2 \times 0,05 = 0,1$ watt.

Passons des watts aux joules en sortant le facteur « unité de temps » contenu dans le watt, autrement dit en utilisant la formule connue :

$$W \text{ joules} = E \text{ volts} \times I \text{ amp.} \times T \text{ secondes}$$

(comp. avec p. 25) et en admettant que la durée du mouvement de l'armature et des aiguilles a été de 0,1 seconde, ce qui est à peu près conforme à la réalité ; nous pourrions écrire alors :

$$W = 2 \times 0,05 \times 0,1 = 0,01 \text{ joule.}$$

Nous constatons ainsi que le travail mécanique contenu dans le courant à l'entrée de l'électro-aimant est *dix fois plus grand* que celui de 0,001 joule mesuré tout à l'heure à la pointe de l'aiguille des minutes, en sorte que le coefficient de sûreté de marche de notre mécanisme de réceptrice à l'état de neuf, est de :

$$\frac{0,01}{0,001} = 10.$$

Ce rapport renversé, soit $\frac{1}{10}$ ou 10^{-1} , donne en même temps

la valeur du rendement électro-mécanique *initial* de la réceptrice qui est ainsi de 10 % seulement. Nous employons ici le mot « initial » afin qu'on sente bien la distinction qu'il faut faire entre le rendement de l'appareil à l'état de neuf et son rendement à l'état *sale* ou même *usé* : le premier ne peut être que très mauvais puisqu'en fait le 90 % de l'énergie électrique est évidemment perdu en chocs, vibrations, etc., transmis inutilement, voire le plus souvent, nuisiblement aux aiguilles et autres organes mobiles de la réceptrice ; le second, au contraire, est sans cesse en augmentation ; il varie à mesure que le degré de saleté du mécanisme est lui-même plus ou moins élevé. Près de la limite (rendement égal à 100 %) l'horloge s'arrête, tout l'excédent encore disponible de la force sur les résistances croissantes (dues elles-mêmes aux facteurs changeants mentionnés plus haut), étant absorbé, et alors la partie de l'énergie électrique introduite qui, tout à l'heure était perdue (on pourrait dire aussi *dégradée*) en chocs et vibrations, diminue peu à peu, ce qui augmente d'autant le rendement *final* de la réceptrice.

En d'autres termes, le coefficient de sûreté de marche d'un mécanisme électromagnétique (et en général de n'importe quel appareil dans lequel une force donnée doit vaincre des résistances variables), varie en raison inverse du rendement de ce mécanisme.

Il existe cependant un moyen de rendre aussi lente et par conséquent aussi favorable que possible cette marche inverse du coefficient de sûreté et du rendement. C'est d'utiliser le mieux possible dans l'électro-aimant et dans son armature mobile elle-même, l'énergie que contient le courant. Or, il est facile de démontrer tout d'abord que cette utilisation est *extrêmement* défectueuse avec la disposition que représente la figure 70 et que nous avons appelée *classique* (parce qu'elle est celle qui a été employée dès l'origine de la télégraphie Morse).

Si nous analysons, en effet, ce qui se passe à partir du moment où l'armature *d* a commencé d'être attirée par les deux pôles *N* et *S*, voici ce que nous constatons successivement :

1^o La force attractive de ces pôles est faible au commencement du mouvement, grâce au fait qu'à cet instant l'épaisseur de l'entrefer et la dispersion des lignes de force magnétiques sont toutes deux à leur maximum.

2° Par contre, cette force augmente très rapidement à mesure que le mouvement commencé se poursuit.

3° Si bien qu'à la fin de la course de l'armature butant contre son arrêt, cette force atteint une valeur maximum qui peut être, selon les cas, 4, 5, 6, etc., fois plus grande que celle qui existait au début du mouvement.

4° D'autre part, l'épaisseur maximum que, dans la pratique courante, on donne à l'entrefer, ne dépasse guère 2 à 3 millimètres, parce qu'en dehors de cette limite, il faudrait donner au flux des lignes de force magnétiques une si grande valeur, que celle-ci serait très coûteuse à obtenir et, en tout cas, hors de proportion avec l'effort relativement petit que nécessite le déplacement d'aiguilles équilibrées et protégées.

5° Le fait que la force d'attraction agissant sur l'armature, arrive à son maximum d'intensité au moment précis où le déplacement des aiguilles est terminé, est très défavorable mécaniquement. Il en résulte un *lancement* brutal des organes transmettant le mouvement de l'armature aux aiguilles, lancement qui est d'autant plus violent que la masse de ces aiguilles et surtout celle de l'aiguille des minutes (éventuellement des secondes), est plus grande et que la durée de leur déplacement est plus courte.¹

Certains constructeurs se sont efforcés de rendre moins rapide la course de l'armature, en obligeant celle-ci à effectuer, en plus du travail minime que nécessite le déplacement des aiguilles, un travail supplémentaire relativement considérable destiné à ralentir cette course, par exemple au moyen d'un rouage dont le dernier mobile est un volant réglable.

D'autres, préoccupés surtout de remédier à l'inconvénient signalé sous 1°, 2° et 3° ci-dessus, ont interposé, entre l'armature à force attractive brutalement croissante et la minuterie, des organes mécaniques spéciaux dits *égaliseurs* ou aussi *répartiteurs*, dont le rôle est de rendre à peu près constante la force agissant sur la minuterie, ou mieux dit, de la faire mécaniquement varier dans la mesure même où varie, en sens inverse, la force attractive de cette armature. De là les égaliseurs Robert-Houdin (à courbes roulantes), ceux de Froment et de Roux (à leviers articulés) et d'autres encore étudiés par Du Moncel

¹ Si, dans certaines applications telles que la télégraphie, l'enregistrement chronographique et d'autres encore, cette courte durée constitue évidemment un avantage, elle est non moins évidemment un inconvénient dans un compteur électrochronométrique battant la minute ou même la seconde.

et Bouasse et mentionnés dans la partie pratique du présent ouvrage.

Mais ces égaliseurs ne résolvent que d'une manière imparfaite le problème posé.

Si nous cherchons à tirer les conséquences des considérations précédentes et que nous nous efforcions en outre d'obtenir un meilleur rendement initial (p. 109) de notre réceptrice, sans d'autre part diminuer trop sa sûreté de marche, nous arrivons aux conclusions suivantes :

I. L'électro-aimant en forme de fer à cheval dit classique (avec armature prismatique à faible course, qu'une force antagoniste, ressort, contrepoids, etc., ramène à la position non-attirée), est le plus défectueux de ceux que l'on a employés en horlogerie électrique comme organe moteur des aiguilles des réceptrices.

II. Il faut modifier dans ce mécanisme la disposition relative des pôles fixes de l'électro et de son armature mobile de telle manière :

a) que tous les mouvements de l'armature aient lieu électromagnétiquement, ce qui entraîne la suppression de toute force antagoniste agissant mécaniquement ;

b) que la course de l'armature soit, à chacun de ses mouvements, aussi longue que possible, ce qui permet d'allonger aussi le temps qu'elle met à effectuer cette course ;

c) que la force magnétique qu'exercent les pôles fixes sur l'armature mobile soit aussi constante que possible, notamment pendant la partie de la course de celle-ci où s'opère le déplacement des aiguilles ;

d) qu'arrivée près de la fin de sa course, l'armature soit abandonnée le plus doucement possible par la force magnétique finissante, afin que soient évités le *lancement* des aiguilles et les chocs, contrechocs, oscillations, etc., qui en résulteraient et qui compromettraient inévitablement le bon fonctionnement de la réceptrice.

III. Les conditions a), b), c) et d) ci-dessus sont remplies lorsqu'on emploie un électro-aimant en forme de fer à cheval, dans lequel le sens du courant est renversé à chaque émission successive (dans une distribution d'heure unifiée par compteurs électro-chronométriques, ce renversement est produit par l'horloge-mère de l'installation) et lorsqu'on *polarise*, comme on dit, l'armature mobile, c'est-à-dire lorsqu'on fait en sorte que la partie de cette armature qui limite l'un des côtés de l'entrefer, soit toujours un pôle nord ou toujours un pôle sud. On obtient cette polarisation, soit en faisant de l'armature elle-même un aimant (permanent ou quelquefois temporaire), ayant l'un de ses pôles dans le voisinage immédiat des deux pôles alternativement

changeants de l'électro, soit en polarisant *nord* au moyen d'un aimant permanent *fixe* l'armature mobile tout entière (qui est alors en fer doux) et *sud* les deux extrémités polaires fixes de l'électro (pôle fourchu) (ou vice versa, sud la première et nord les secondes). Quand l'armature mobile est un aimant temporaire, elle consiste en un noyau de fer doux enroulé d'un fil isolé qu'excite, aux moments voulus, une dérivation du courant principal actionnant la réceptrice.

Nous aurons de nombreuses occasions de décrire, dans notre partie pratique, des dispositifs d'électro-aimants à armature polarisée, ayant donné de bons résultats en électro-chronométrie.

Solénoïde à plongeurs. — On substitue parfois en horlogerie électrique, à l'action d'une armature d'électroaimant, celle d'un *plongeur* en fer doux ou en acier aimanté que *suce*, lorsqu'il est parcouru par un courant, un solénoïde semblable en principe à celui de la figure 56 de la page 91. Ce dispositif électromagnétique présente, sur l'électro-aimant à armature plate des figures 61 ou 70, l'avantage d'une course beaucoup plus étendue de l'organe mobile. Les figures 71 et 72 empruntées au *Cours de Magnétisme et d'Électricité*, tome 2, deuxième édition, du professeur Bouasse, donne une idée de la relation qui existe entre la force de succion bb' portée en ordonnée, et la position b de l'extrémité du plongeur en fer doux A , portée en abscisse, lorsque solénoïde et plongeur sont tous deux de forme cylindrique.

Le fer tendant à s'aimanter au maximum, la tige Ab tend à se placer symétriquement par rapport à la bobine DE (fig. 71) ; toute-

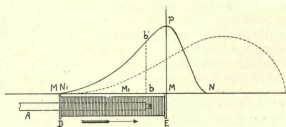


Fig. 71

fois, si Ab est d'une grande longueur comparée à DE , la force peut être pratiquement nulle avant que ce résultat soit atteint. En réalité, on obtient la courbe en trait plein MN, PN , et la succion n'est sensible que lorsque l'extrémité b du plongeur Ab arrive au voisinage de l'ex-

trémité du solénoïde DE . A mesure que la tige avance, la force de succion croît ; elle passe par un maximum M quand l'extrémité b de la tige est voisine de celle E de la bobine ; elle décroît ensuite rapidement et devient presque nulle pour une certaine position N du bout b .

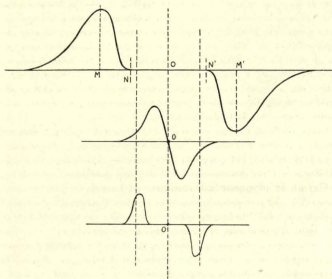


Fig. 72

Mais la courbe en trait plein ne représente que la moitié du phénomène, car si nous continuons à déplacer (avec la main par ex.) le plongeur dans le sens de la flèche, nous constatons d'abord que la force est *nulle* pendant un parcours relativement grand, puis qu'à mesure que le bout gauche du plongeur s'approche de la bobine, le sens de la force de succion change et devient inverse de celui de la flèche, si bien qu'en faisant abstraction de l'hystérésis, on obtient une seconde portion de courbe $N'M'$ (fig. 72 en haut) symétrique de la première par rapport au point O . On voit ainsi que lorsque la tige est longue par rapport à la bobine, la courbe ne dépend pas de la longueur ; seule varie la distance NN' des deux positions pour lesquelles, pratiquement, la force de succion devient nulle, d'une part, et cesse de l'être, d'autre part.

Quand au contraire la tige du plongeur est courte par rapport à la bobine, la succion n'est sensible que lorsque la tige est au voisinage des extrémités du solénoïde ; elle est à peu près nulle lorsque le plongeur est tout entier dans le champ intérieur de la bobine, qui est sensiblement uniforme. Ici encore les deux portions de la courbe sont symétriques par rapport au point O (fig. 72 en bas) et placées à une distance sensiblement constante égale à la longueur de la bobine.

Le professeur Bouasse, auquel nous empruntons non seulement les figures 71 et 72, mais encore le texte qui les commente, fait voir qu'on peut réaliser tous les intermédiaires entre ces deux cas extrêmes. La force est à peu près nulle tant que la tige est hors de la bobine ; elle s'annule encore quand les centres coïncident. La courbe présente donc toujours deux portions symétriques par rapport à un point (abstraction faite de l'hystérésis).

Cette particularité du solénoïde à plongeur est particulièrement propre à assurer la réalisation facile des conditions b , c et d formulées sous II de la page 111, à propos des électro-aimants à armatures mobiles commandant des mécanismes d'horloges électriques secondaires.

Cas où le plongeur est conique. — Lorsque le plongeur a la forme d'un cône se présentant par la pointe à l'action d'un solénoïde cylindrique, on obtient une courbe (pointillée sur la figure 71) qui est moins abrupte que celle du plongeur cylindrique et qu'on peut même amener à être presque horizontale (force de succion pratiquement invariable) au cours d'un déplacement relativement considérable de l'organe électromagnétique mobile.

La courbe d'attraction varie de forme quand on modifie le courant qui passe dans le solénoïde. Lorsque le champ H est faible, l'attraction est sensiblement proportionnelle au carré H^2 de ce champ, ou, ce qui revient au même, au carré des ampères-tours (Bouasse, *ibidem*).

Bobine à plongeur polarisé. — Lorsque le plongeur, au lieu d'être en fer doux, est un aimant (de forme prismatique ou cylindrique), il faut que les deux cortèges de lignes de force magnétiques, celui du solénoïde et celui de l'aimant, *s'attirent* réciproquement (p. 105), autrement dit que ce soit le pôle nord de l'aimant qui soit sucé par le pôle sud du solénoïde ou vice versa, le pôle sud du premier par le pôle nord du second ; cela s'obtient en choisissant en conséquence le sens de circulation du courant dans le fil solénoïdal. On peut d'ailleurs baser des appareils transformateurs d'énergie électrique en énergie mécanique, aussi bien sur le phénomène de répulsion que sur celui de succion.

Lorsqu'un tel transformateur a pour but l'entretien électrique des oscillations d'un pendule, celui-ci porte, comme organe électromagnétique mobile, tantôt l'aimant et alors c'est le solénoïde qui est fixe, tantôt le solénoïde et alors c'est l'aimant qui est fixe.

Les figures 73, 74, 75 et 76 représentent quatre dispositifs de la première espèce dans lesquels la plupart des plongeurs sont recourbés selon les arcs décrits depuis les centres de suspension des pendules. Dans le premier dispositif, l'aimant est un simple barreau ayant ses deux pôles éloignés l'un de l'autre dont l'un, le pôle nord, est soumis à

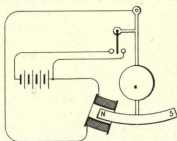


Fig. 73

l'influence d'un seul solénoïde fixe placé excentriquement (fig. 73).

Dans le second dispositif, l'aimant a la même forme que dans le premier, mais ses deux pôles sont simultanément influencés par deux solénoïdes fixes placés de part et d'autre du pendule (fig. 74).

Dans le troisième, l'aimant est en forme de fer à cheval et ses deux pôles sont simultanément influencés par un seul solénoïde fixe, l'un d'eux oscillant

à l'extérieur, l'autre à l'intérieur de la bobine (pendule Féry, fig. 75).

Enfin dans le quatrième dispositif (fig. 76) le pendule oscillant est armé de deux aimants parallèles en forme

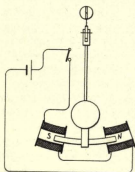


Fig. 74

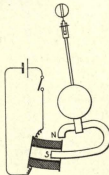


Fig. 75

de fer à cheval dont les pôles en regard sont de noms contraires et qui se déplacent parallèlement au plan des spires du solénoïde fixe (brevet Poncet et Pons).

Les figures 77, 78 et 79, tirées comme les précédentes de l'intéressant article que M. l'ingénieur Marius Lavet, de Paris, a publié dans les N^{os} des 2 et 9 décembre 1922 de la *Revue générale de l'électricité* (Paris, 12, place de Laborde), donnent quelques exemples de

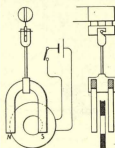


Fig. 76

dispositifs dans lesquels le ou les aimants sont fixes et le ou les solénoïdes mobiles ; ceux-ci oscillent avec les pendules auxquels ils sont adaptés. Ces figures se comprennent d'elles-mêmes. On voit que parmi les constructeurs (Holden, Beatley, Moulin et Favre-Bulle, etc.) qui ont adopté le principe des aimants fixes et des solénoïdes mobiles, les uns font se déplacer ceux-ci parallèlement, les autres perpendiculairement au plan des spires des bobines.

De l'étude que M. Lavet a faite sur le fonctionnement des pendules électriques dont les oscillations sont entretenues au moyen d'aimants réagissant sur des solénoïdes, il résulte qu'il y a ici deux forces en jeu : l'une est fournie par la pile au moment où le pendule ferme automatiquement le contact-interrupteur du circuit solénoïde-pile ; elle a pour effet de donner au pendule, à chaque oscillation, une impulsion

qui tend à *augmenter* son amplitude ; l'autre force provient de l'*induction* (p. 117 et suiv.) que provoque dans le fil du solénoïde le mouvement plus ou moins rapide de l'aimant par rapport au solénoïde (ou du solénoïde par rapport à l'aimant) ; elle agit en sens inverse de la première et tend à *diminuer* l'amplitude des oscillations du pendule.

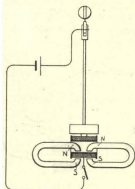


Fig. 77

La combinaison de ces deux forces, dont la première dépend de la force électromotrice de la pile et dont la seconde peut être appelée force contre-électromotrice d'induction, a comme résultat un réglage automati-

que de l'amplitude des oscillations.

En effet, si, par suite soit d'une diminution de la force électro-

motrice de la pile, soit d'une augmentation des résistances mécaniques que le pendule a à vaincre, l'amplitude d'oscillation diminue, la force contre-électromotrice, qui dépend de la vitesse plus ou moins grande du pendule et par conséquent aussi de l'amplitude, *diminue*, elle aussi. Dans le cas inverse (augmentation de l'amplitude, soit par augmentation de la force électromotrice de la pile, soit par diminution des résistances mécaniques), la force contre-électromotrice d'induction *augmente*.

Ainsi, à chaque valeur (plus ou moins variable) des impulsions électriques ou des résistances mécaniques, correspond une valeur spéciale de l'amplitude du pendule. Pour une pile et pour des résistances mécaniques données, les variations d'amplitude seront relativement faibles, et la marche de l'horloge actionnée par le pendule n'en sera pas très influencée.

D'autre part, comme les deux courants antagonistes provenant l'un de la pile, l'autre de l'induction de l'aimant sur le solénoïde, circulent

dans un seul et même circuit, ils tendent à se mettre en équilibre, autrement dit, à s'annuler réciproquement ; il en résulte une dépense de pile très minime et une durée très longue des surfaces du contact-interrupteur qu'il est alors inutile de défendre contre les étincelles des extra-courants (p. 121 et suiv.), celles-ci étant négligeables.

2^e Phénomènes d'induction.

De même qu'un courant électrique peut produire des effets magnétiques (action d'un courant sur l'aiguille aimantée, aimantation temporaire du noyau en fer doux d'un électro-aimant, etc.), de même un

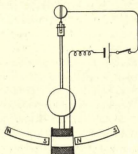


Fig. 78

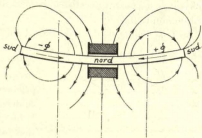


Fig. 79

aimant ou un fil porteur d'un courant, peuvent, par influence, c'est-à-dire à distance, donner naissance à des courants électriques. C'est à cette dernière classe de phénomènes qu'on a donné le nom d'*induction*. Le principe général de l'induction est le suivant :

Lorsque, par un procédé quelconque, on fait varier le flux de force magnétique qui traverse un circuit conducteur fermé, ce dernier devient le siège d'un courant électrique temporaire dont la durée est égale à celle de la variation du flux.

Le courant ainsi produit est dit *induit* et le champ magnétique variable est appelé *inducteur*.

L'induction électrique peut avoir lieu par variation du champ inducteur obtenue soit par modification de l'intensité de ce champ, soit par son déplacement, ou bien aussi par déplacement du système induit.

Les figures 80 et 81 font voir, l'une un circuit fermé *C* coupant en se déplaçant, selon la grande flèche *f*, dans un champ uniforme, un flux rendu variable du circuit coupant les lignes de force, l'autre un circuit se déplaçant parallèlement à lui-même dans un champ magnétique non uniforme.

Si *C* se déplaçait dans le champ uniforme de la figure 81 parallèlement à lui-même, il n'y aurait pas

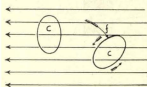


Fig. 80

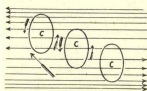


Fig. 81

variation du flux embrassé par le circuit et par conséquent pas de production de courants induits dans ce dernier.

Le principe général de l'induction formulé ci-dessus comporte les corollaires suivants qui ont été établis à la suite de nombreuses expériences à résultats concordants :

1^o Deux variations du flux égales et de sens contraires produisent des courants induits égaux et de sens contraires.

2^o La quantité d'électricité qui correspond au courant induit est indépendante de la durée du cou-

rant induit, ou, ce qui revient au même, de la durée de la variation du flux de force.

3^o La nature du corps constituant le conducteur induit n'exerce

d'influence que par sa résistance spécifique et sa perméabilité magnétique.

Quant au *sens* même du courant induit, il est tel, d'après la loi de Lenz, généralisée par Maxwell, qu'il tend à s'opposer à la variation du flux de force embrassé par le circuit.

Si, par exemple, ce flux *augmente*, le courant induit s'opposera à cette augmentation, et alors son sens sera l'inverse de celui du courant produisant le flux, autrement dit, du courant inducteur.

Si le flux *diminue*, le courant induit s'opposera à cette diminution et alors son sens sera tel que le champ magnétique qu'il produit soit de même sens que le champ inducteur, afin d'en ralentir la diminution ; dans ce cas, le courant induit sera *direct* par rapport au courant inducteur (de même sens que lui).

Si le circuit est déjà porteur d'un courant, l'effet de l'induction s'ajoute au courant préexistant ou s'en retranche suivant que le courant développé à chaque instant, est de même sens ou de sens inverse.

En général, tout déplacement relatif d'un conducteur (rectiligne ou non) et d'un champ magnétique ou galvanique crée, dans ce conducteur, une *force électromotrice d'induction*. Dans le cas spécial d'un circuit rectiligne se déplaçant parallèlement à lui-même, dans un

champ magnétique uniforme, la force électromotrice induite se calcule au moyen de la formule suivante :

$$E = Hlv \sin \alpha \cos \varphi,$$

dans laquelle H désigne l'intensité du champ magnétique, l la longueur du circuit rectiligne, v sa vitesse, α l'angle du conducteur avec la direction des lignes de force, φ l'angle que fait la direction du mouvement avec la direction de la force exercée par le champ magnétique.

Lorsque le conducteur se meut dans la direction de la force, on a $\varphi = 0$ et $\cos \varphi = 1$, et par suite aussi :

$$E = Hlv \sin \alpha.$$

La figure 82 montre la disposition de l'expérience célèbre qui a conduit Faraday à la découverte des courants induits.

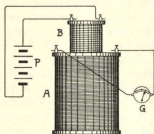


Fig. 82

Un solénoïde droit A a les deux extrémités de son enroulement reliées avec un galvanomètre G . Dans son intérieur, qui est vide, on peut introduire axialement et à volonté soit un aimant droit, soit un second solénoïde B plus petit que le premier dont le fil est relié à la pile P . Voyons d'abord le cas des deux solénoïdes A et B .

Aussi longtemps que B est laissé immobile par rapport à A , l'aiguille de G reste elle-même immobile.

Par contre, si l'on enfonce rapidement B dans l'intérieur de A , l'aiguille de G dévie brusquement pour revenir au zéro dès que le mouvement de B a cessé. Si ensuite on retire, rapidement aussi, B hors de A , l'aiguille de G dévie encore, mais cette fois en sens inverse de la première, pour revenir de nouveau au zéro.

Les mêmes déviations, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, ont lieu sur G , si, laissant B et A immobiles, on ouvre et ferme alternativement le circuit de la pile et de B .

Les mêmes courants alternés circulent dans A et G lorsque, A et B étant immobiles, on fait varier le circuit PB , autrement dit, l'intensité I du courant inducteur.

Enfin si, au lieu du circuit inducteur PB , on déplace rapidement dans l'intérieur du solénoïde A (ou simplement dans son voisinage immédiat) un aimant, on reproduit dans les mêmes conditions de sens, les déviations de l'aiguille de G .

Il est évident que pour introduire, par exemple, l'aimant dans le solénoïde A , il faut faire, avec la main, un certain *effort* qui est d'ailleurs d'autant plus grand que la résistance électrique du fil de A est elle-même plus faible, et que par conséquent les courants induits dans ce fil sont, en vertu de la loi d'Ohm, plus intenses. Or, qui dit effort dit énergie, en sorte que le dispositif de Faraday se présente immédiatement à l'esprit comme un transformateur d'énergie mécanique en énergie électrique. Cette remarque reste vraie quand on substitue à l'aimant de Faraday le solénoïde porteur de courant de la figure 82.

La disposition mécanique des organes inducteurs et du système induit peut être choisie de telle façon que les courants induits presque instantanés se succèdent avec une grande rapidité dans le fil qui les porte et puissent être recueillis à ses extrémités, et alors on a ce qu'on appelle les *générateurs mécaniques d'électricité* bien connus sous les noms de machines magnéto — respectivement — dynamo-électriques.

Ces machines présentent l'immense avantage d'être *reversibles*,

c'est-à-dire de pouvoir fonctionner aussi bien comme réceptrices que comme génératrices ; quand elles travaillent comme réceptrices, elles reçoivent le nom de *moteurs électriques* et transforment alors l'énergie électrique en énergie mécanique.

Un autre appareil très connu et très intéressant, basé aussi sur les phénomènes d'induction, est la *bobine de Ruhmkorff* qui transforme l'énergie électrique à basse tension que lui fournit une pile, par exemple, en énergie à haute tension capable de produire aux bornes du fil induit des étincelles de grandes longueurs, analogues, en petit, à celles de la foudre.

Le but pratique du présent ouvrage étant d'étudier les applications de l'électricité à la mesure du temps, nous sommes autorisé à renvoyer le lecteur qu'intéresseraient surtout les applications industrielles de l'électricité (machines-dynamos, distributions de lumière et de force, traction, etc.) aux livres des spécialistes, et en ce qui concerne la bobine de Ruhmkorff, aux manuels de physique.

Nous nous bornerons à développer, dans ce qui suit, quelques particularités et lois des courants d'induction pouvant intéresser plus spécialement les horlogers-électriciens.

Self-induction. — Les phénomènes d'induction mutuelle tels qu'ils se produisent dans l'expérience de la figure 82, entre deux circuits électriquement isolés l'un de l'autre, et notamment dans la bobine de Ruhmkorff, ont aussi lieu lorsque les deux circuits n'en font plus qu'un seul, autrement dit lorsque le circuit inducteur se confond avec le circuit induit. L'induction mutuelle se change alors en *self-induction* (auto-induction).

La self-induction se produit dans un circuit, lorsque ce dernier est traversé par un courant électrique d'intensité variable ; ce circuit devient alors le siège d'une force électromotrice d'induction qui tantôt s'oppose, tantôt s'ajoute à celle du courant principal (p. 119). Si, par exemple, ce dernier est interrompu (rupture), le courant de self-induction est dit *direct* (de même sens que le courant principal) ; si, au contraire, on rétablit le courant principal (fermeture), le courant correspondant de self est dit *inverse* (de sens opposé à celui du principal).

La self-induction, très faible dans un fil tendu droit, est relativement intense, lorsque le circuit renferme des bobines (solénoïdes) dont le fil isolé fait un grand nombre de tours, tous enroulés dans le même sens, et surtout lorsque ces bobines enveloppent des noyaux de fer doux (électro-aimants). Les réseaux d'horloges électriques uni-

fiées étant tous dans ce dernier cas, il est nécessaire de les défendre contre les effets nuisibles des courants d'induction. Ceux-ci se manifestent soit par des étincelles de rupture qui, répétées, détériorent les contacts du ou des interrupteurs de groupes, soit par des mouvements intempestifs des armatures des réceptrices (Partie pratique).

On emploie souvent en électro-chronométrie des résistances ohmiques dépourvues de self telles que des filaments de lampes à incandescence ou des bobines enroulées en double comme l'indique la figure 83, l'un des enroulements, fait à l'inverse de l'autre, en annulant l'effet. Nous verrons que de telles bobines dites *anti-inductives* sont souvent employées avec succès en horlogerie électrique pour annuler, ou tout au moins fortement atténuer, les effets de self.

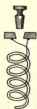


Fig. 83

Il résulte de ce que nous avons vu, qu'un circuit fermé, porteur d'un courant, peut être considéré en dehors de tout champ magnétique extérieur, mais alors, il est néanmoins soumis à l'influence du champ magnétique qu'il produit lui-même, et est ainsi traversé par un certain flux de force magnétique Φ .

On appelle *coefficient de self-induction* un facteur L_s tel qu'on ait :

$$\Phi = L_s I$$

I étant l'intensité du courant en cause. De cette expression, on tire :

$$L_s = \frac{\Phi}{I} = \frac{\text{flux}}{\text{courant}}$$

en sorte que l'équation de dimensions du coefficient de self-induction est (p. 41 et 83) :

$$L_s = \frac{\text{flux}}{\text{courant}} = \frac{L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}}{L^{1/2} M^{1/2} T^{-1}} = [L].$$

On voit que ce coefficient est homogène à une longueur L . Dans le système C. G. S. l'unité de coefficient d'induction se mesure en centimètres et alors l'unité pratique C. G. S. correspondante, qui a été appelée *henry*, est telle qu'on a :

$$1 \text{ henry} = 10^9 \text{ centimètres.}$$

Or 10^9 centimètres équivalent à un quart de méridien terrestre. C'est pour cette raison qu'on désigne aussi l'henry sous le nom de *quadrant*.

Une bobine (ou solénoïde) dont le coefficient de self est L_s absorbe,

sous une forme encore inconnue que l'on suppose être une déformation élastique de l'éther environnant, une quantité d'énergie qui est emmagasinée à l'état potentiel et dont la valeur est donnée par la formule :

$$W = \frac{L_s I^2}{2}.$$

Cette énergie reparaît à la rupture du courant sous la forme d'*extra-courant*, d'autant plus intense que L_s est plus grand et que la rupture est plus brusque, c'est-à-dire que cette énergie se dépense en un temps plus court. C'est ce qui explique pourquoi prennent naissance, au point de rupture d'un circuit où se trouvent un ou plusieurs électro-aimants, des étincelles qui révèlent la présence d'un voltage bien supérieur à celui du courant principal.

Lorsqu'on remplace le milieu ordinaire (air ou vide) par un milieu magnétique consistant, par exemple, en un noyau de fer doux, l'induction magnétique s'accroît dans la proportion de μ (p. 95) à 1 ; autrement dit, le flux produit augmente proportionnellement à la perméabilité magnétique du noyau.

Le *Formulaire de l'électricien* de Hospitalier, auquel nous avons emprunté en partie ce qui précède¹, donne en *centimètres* les valeurs algébriques du coefficient de self-induction dans les différents cas où le fil du circuit considéré est rectiligne, circulaire, enroulé en bobine de section ronde ou carrée, etc. Les formules permettant de calculer ces valeurs ont été établies en supposant que le milieu ambiant est l'air ou le vide. Lorsqu'on a affaire à un milieu de perméabilité magnétique égale à μ , ces valeurs doivent être multipliées par μ .

Voici, à titre d'exemple, quelles sont en *henrys* les coefficients de self-induction des électro-aimants habituellement employés en télégraphie Morse.

D'après *Vaschy*, on a dans le récepteur Morse français :

- a) pour chacune des deux bobines
sans noyau de fer $L_s = 0,233$ et $0,265$ henry
- b) pour chacune des deux bobines
avec noyau de fer $L_s = 1,65$ et $1,71$ »
- c) comme en b) mais avec la culasse
en plus et les deux bobines inter-
calées en série $L_s = 6,37$ »

¹ Voir aussi PALAZ, *Cours d'électricité industrielle*, Librairie Rouge, Lausanne 1902.

d) enfin comme en c) avec en plus l'armature collée sur les pôles de l'électro. $L_s = 10,68$ henrys

D'après *Grawinkel*, on a pour le récepteur Morse allemand :

dans le cas a) ci-dessus, mais avec bobines en série $L_s = 0,7$ henry
 dans le cas b) ci-dessus avec noyaux et bobines en série $L_s = 9,0$ »
 dans le cas c) ci-dessus avec noyaux, mais sans armature $L_s = 13,0$ »
 dans le cas d) ci-dessus avec noyaux et armature $L_s = 18,0$ »

D'autre part, M. Devaux-Charbonnel (*État actuel de la science électrique*) donne les valeurs suivantes pour l'électro-aimant du récepteur Morse actuellement employé en France :

1. Armature absente $L_s = 12$ à 22 henrys
2. Armature présente en posit. non attirée $L_s = 14$ à 25 »
3. Armature présente en posit. attirée . . . $L_s = 20$ à 30 »

Enfin, M. Silvanus P. Thompson (*L'Électro-aimant*, traduit par Boistel) fournit d'après M. Preece, autrefois directeur du Post-Office d'Angleterre, les données

résultant de la figure 84 ci-contre, dans laquelle on a successivement :

a) une bobine seule avec son noyau ;

b) les deux bobines en série avec leurs noyaux, mais sans culasse ni armature ;

c) comme en b), mais avec culasse ;

d) comme en c), avec armature en place ;

e) comme en d), mais avec les deux bobines en parallèle ;

f) comme en e), mais avec culasse et armature sciées ainsi que cela existe chez les types-étalons des relais postaux-télégraphiques anglais.

M. Preece, en prenant comme unité de comparaison l'intensité du courant de rupture qui existe dans le cas a) ci-dessus, a trouvé respectivement pour les autres cas les chiffres 17, 496, 2238,

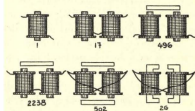


Fig. 84

502 et 26. Ces chiffres n'étaient autres que les élongations observées sur un galvanomètre balistique quand le circuit reliant la pile et l'électro-aimant en expérience était ouvert à l'aide d'une clef qui au même instant réunissait au galvanomètre les fils de l'électro.

M. Preece a constaté que l'ancien modèle de relais du Post-Office, dont la self-induction était assez grande pour donner au galvanomètre une élongation de 1688, permettait une vitesse de transmission télégraphique qui n'était que de 50 à 60 mots par minute, alors qu'avec les relais-étalons construits d'après les nouvelles données, cette vitesse était décuple (500 mots par minute).

On voit que la self-induction des électro-aimants dépend à un haut degré de la disposition du circuit magnétique (disposition du ou des noyaux, de la culasse, de l'armature, des enroulements, etc.) ; elle varie aussi pendant que l'armature fonctionne et cela d'autant plus que la course de celle-ci est plus grande, autrement dit que le passage de l'entrefer d'armature maximum à l'entrefer minimum est plus ou moins rapide.

Plus la self-induction d'un circuit donné est grande, plus la durée de la période variable de l'émission, celle qui suit immédiatement la fermeture du circuit par l'interrupteur, est elle-même longue. La self retarde ainsi l'établissement du courant de régime, celui que caracté-

térise la loi d'Ohm $I = \frac{E}{R}$.

L'intensité I_t du courant à un moment quelconque t de la période variable se calcule au moyen de la formule de *Helmholtz* qui est la suivante :

$$I_t = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{Rt}{L_s}} \right)$$

et dans laquelle E est la force électromotrice exprimée en volts, R la résistance de l'ensemble du circuit en ohms, L_s son coefficient de self en henrys et e le nombre 2,7183, base des logarithmes népériens.

Il est évident, tout d'abord, que l'expression entre parenthèses est fractionnaire puisqu'elle consiste en l'unité diminuée d'un nombre positif e affecté d'un exposant négatif. I_t sera donc en tout cas plus

petit que $\frac{E}{R}$ ou que l'intensité de régime I qu'atteint le courant, une fois passée la période variable. Supposons, pour fixer les idées, que nous ayons $E = 10$ volts, $R = 1$ ohm, $L_s = 10$ henrys, on obtiendra

le tableau suivant¹ qui donne en ampères les valeurs de I_t en fonction du temps t exprimé en secondes :

t en secondes	$e - \frac{R}{L_s}t$	I_t en ampères
0	1	0
1	1,105	0,950
2	1,221	1,810
5	1,649	3,936
10	2,718	6,343
20	7,589	8,646
30	20,08	9,501
60	403,4	9,975
120	162 800,0	9,999

La valeur limite I de I_t est ici de 10 ampères $\left(\frac{E}{R} = \frac{10 \text{ volts}}{1 \text{ ohm}}\right)$.

On voit que, grâce à la self relativement grande de 10 henrys (par rapport à $R = 1 \text{ ohm}$), I_t a encore au bout de 30 secondes une valeur de 9,5 ampères et que c'est à peine si, après 120 secondes écoulées depuis la fermeture de l'interrupteur du circuit, l'intensité de régime I est enfin établie.

Constante de temps. — On appelle constante de temps d'un électro-aimant de récepteur le rapport $\frac{L_s}{R}$ de la self-induction à la résistance ohmique.

Supposons, par exemple, qu'on ait $E = 10 \text{ volts}$, $R = 400 \text{ ohms}$ et $L_s = 8 \text{ henrys}$, la valeur du courant de régime I sera $\frac{10}{400} = 0,025$ ampères et la constante de temps sera $\frac{L_s}{R} = \frac{8}{400} = 0,02 \text{ secondes}$.

Plus la constante de temps d'un appareil récepteur est petite, plus son fonctionnement est rapide. On comprend dès lors que ce facteur joue un rôle important en télégraphie ; en effet, si la constante de temps est grande, elle a pour effet de rendre les signaux successifs indistincts et limite ainsi la rapidité des transmissions télégraphiques.

On peut réduire la constante de temps, soit en diminuant la self-induction, soit en augmentant la résistance. Nous venons de voir comment M. Preece s'y est pris pour diminuer la self de ses relais-étalons. Quant à l'augmentation de la résistance d'un circuit, elle

¹ Voir SILVANUS THOMPSON, *L'Électro-aimant*.

peut facilement s'obtenir en intercalant en série avec le récepteur une résistance ohmique (dépourvue de self).

Nous ne nous attarderons pas davantage sur la question très intéressante que nous venons d'effleurer ici, parce qu'elle ne joue pas en horlogerie électrique un rôle aussi considérable qu'en télégraphie. D'une manière générale, les émissions de courant employées dans les installations d'unification d'heure, par exemple, se suivent à intervalles réguliers relativement éloignés l'un de l'autre, et elles ont en outre une durée assez longue, pour que l'on n'ait pas à se préoccuper beaucoup du temps plus ou moins rapide que met une armature de récepteur unifié à effectuer sa course ; il suffit, dans la plupart des cas, que ce temps soit *constant*, c'est-à-dire toujours le même pour un électro-aimant et un régime donnés. Cette remarque reste vraie même en matière d'enregistrement chronographique (voir Partie pratique, ch. IX) où l'on a pourtant à apprécier des fractions de seconde extrêmement petites et où il suffit que le temps (*latence*) qui s'écoule entre l'instant précis de la fermeture ou de la rupture du circuit par l'interrupteur (automatique ou non) et l'instant de l'inscription effective du signal correspondant sur la surface d'enregistrement, soit, lui aussi, constant.

Il est des cas cependant où la rapidité de fonctionnement d'une armature d'électro-aimant est désirable. Divers constructeurs se sont occupés de ce problème (Hipp, Marcel Deprez, Mercadier, le révérend F.-J. Smith d'Oxford, l'auteur du présent ouvrage, etc.). Une des meilleures solutions consiste à donner à l'électro-aimant et à son armature de très petites dimensions ; on a ainsi réussi à réduire à 0,0003 et même à 0,00016 seconde la latence d'un appareil chronographique. D'autres précautions encore concernant soit l'enroulement des bobines, soit le mode de couplage de la pile, soit l'adjonction de résistances ohmiques extérieures à l'électro, soit le feuilletage des fers, soit les ressorts de rappel des armatures, etc., peuvent contribuer à rendre la latence de plus en plus petite.

Courants de Foucault. — Les courants ainsi appelés sont un cas particulier des phénomènes d'induction ; au lieu de circuler dans des fils, ils se produisent dans des masses métalliques telles par exemple que les induits des machines dynamo-électriques, etc. Les courants de Foucault sont le plus souvent considérés comme nuisibles, parce qu'ils transforment en chaleur une partie de la force que l'on désire-rail utiliser. Dans les machines dynamos, on les combat en évitant l'emploi de masses conductrices compactes.

3^o Courants alternatifs.

Nous avons déjà dit quelques mots à la page 97 des courants alternés ou alternatifs et vu, entre autres, comment on peut changer, au moyen d'un *inverseur*, le sens de circulation d'un courant de pile dans un circuit extérieur donné (fig. 61).

Les alternances d'un courant peuvent avoir lieu d'une manière irrégulière ; tel est le cas, par exemple, lorsque l'appareil inverseur est manipulé à la main à des instants quelconques se succédant plus ou moins rapidement.

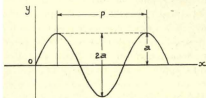


Fig. 85

Lorsque au contraire les alternances se suivent à intervalles réguliers, elles sont dites *périodiques* et l'on peut représenter leur allure au moyen

d'une courbe sinusoïdale telle que celle de la figure 85, dans laquelle l'axe des x ou des abscisses est divisé proportionnellement au temps, et l'axe des y ou des ordonnées, proportionnellement aux intensités (ou aux forces électromotrices) continuellement variables du courant périodique.

On appelle *amplitude* la double ordonnée $2a$ mesurée à l'un des sommets de la courbe sinusoïdale, *période* l'abscisse p séparant un sommet du suivant et enfin *fréquence* le nombre de périodes par seconde.

Nous appliquerons le nom de *courants alternés* aux courants dont les alternances sont irrégulières ou dont la fréquence est inférieure à l'unité ; cela nous permettra de nommer alternés les courants alternativement et régulièrement renversés qui sont employés dans les systèmes d'unification de l'heure par compteurs électro-chronométriques à armatures polarisées. Par contre, nous appellerons *alternatifs*, les courants dont la fréquence est supérieure à l'unité.

Dans cette dernière catégorie rentreront les courants alternatifs mono et polyphasés qui sont couramment employés dans les applications industrielles de l'électricité et que livrent ou consomment en grandes quantités les machines-dynamos appelées *alternateurs* et les moteurs dits à courant alternatif, si répandus aujourd'hui dans les

distributions de force et de lumière électriques concurremment avec les dynamos et moteurs livrant ou consommant des courants dits *continus* (toujours de même sens).

Nous mettons cette courte étude sur les courants alternatifs, à la suite du paragraphe 2^o du présent chapitre IV, consacré aux phénomènes d'induction, parce que les machines que nous venons de nommer sont toutes basées sur l'induction.

Toutefois, de même que nous ne nous sommes pas livré, dans cet ouvrage, à l'étude des générateurs mécaniques et des réceptrices à courant continu, de même et pour la même raison, nous ignorons ici les applications industrielles des courants alternatifs, pour autant du moins qu'il s'agit de leur génération, de leur transformation, de leur réception, et nous nous bornerons à faire les brèves remarques suivantes :

1^o On peut utiliser, en électro-chronométrie, les courants alternatifs des distributions industrielles de force et de lumière (dont les fréquences varient de 30 à 50 ou 60 périodes par seconde) pour actionner des électro-aimants à armatures ou à plongeurs, à la condition de diviser le plus possible les masses de fer fixes ou mobiles qui constituent les circuits magnétiques de ces appareils. On y arrive en employant, pour les noyaux des électros, des faisceaux de fils de fer doux isolés électriquement les uns des autres, et pour les armatures, des superpositions de feuilles de fer doux isolées également les unes des autres par des feuilles de papier imprégnées, l'ensemble de ces feuilles ayant la forme plus ou moins découpée qui convient au bon fonctionnement du système.

Ce *feuilletage*, comme on l'appelle, a pour but d'éviter la formation des courants de Foucault (voir plus haut) ; il doit, cela va de soi, être fait de telle manière que la circulation des lignes de force magnétiques ne soit point entravée, autrement dit, de telle façon que les tôles ou les fils divisés soient toujours orientés dans le sens de circulation de ces lignes.

2^o Nous verrons dans les chapitres suivants qu'un courant alternatif peut aussi affecter la forme représentée par la figure 86 dans laquelle l'amplitude,

au lieu de conserver sa valeur initiale, décroît plus ou moins rapidement pour devenir enfin égale à zéro. On a alors affaire à ce qu'on appelle des *ondes amorties*. C'est le milieu vibrant (éther, air, eau, etc.) plus ou moins résistant, ou, comme on dit aussi,

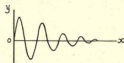


Fig. 86

plus ou moins rigide, qui est la cause de l'amortissement constaté.

On donne par contre le nom d'*ondes entretenues* aux ondes dont l'amplitude reste *constante*.

Les ondes amorties peuvent être assimilées aux oscillations successives d'un pendule qu'on aurait écarté de sa position verticale de repos, puis abandonné à lui-même ; ce pendule oscillera un certain nombre de fois avec une amplitude de plus en plus faible, puis finira par s'arrêter. Il est clair que l'arrêt se produira d'autant plus vite que le milieu dans lequel oscille le pendule sera plus dense (vide, air, eau, etc.).

Quant aux ondes électriques entretenues, elles ont pour analogue, en mécanique, les oscillations d'un pendule qui reçoit une impulsion renouvelée à chaque période et transmise par un mécanisme spécial nommé « échappement ».

1^o Condensation de l'électricité.

Si, dans un circuit métallique tel que celui de la figure 87, qui comprend une pile *a*, un galvanomètre *b* et un interrupteur à main *c*, on coupe en *d* le fil *cdb*, et qu'ensuite on établisse le courant en fermant l'interrupteur *c*, le galvanomètre n'accuse aucune déviation et alors nous pourrions croire et admettre qu'aucun courant n'a passé dans le circuit. Mais tel n'est pas, en réalité, le cas. Une émission de courant, très courte, il est vrai, a passé et nous pourrions nous en assurer en modifiant l'expérience selon la figure 88 dans laquelle la simple coupure du fil en *d* de la figure 87 est remplacée par deux plaques métalliques *d* à grande surface isolées électriquement l'une de l'autre. On constate alors qu'au moment où l'on ferme l'interrupteur *c*, le galvanomètre *b* (qui doit être du type *balistique*) accuse une brève déviation.

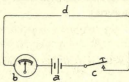


Fig. 87

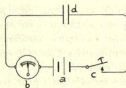


Fig. 88

En outre, si l'on dispose l'interrupteur comme l'indique la figure 89, de telle façon qu'en relevant le levier-clé *c* à deux contacts, le circuit reste fermé sur le galvanomètre *b*, ce dernier accuse une seconde déviation égale à la première, mais de sens inverse.

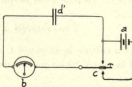


Fig. 89

Le système des deux plaques métalliques *d'* a été appelé *condensateur électrique* ; le courant correspondant à la première déviation est dit *courant de charge* ; celui qui correspond à la seconde déviation, *courant de décharge* du condensateur. Le courant de charge peut être

assimilé à une espèce d'emmagasinement d'une portion de l'électricité fournie par la pile, cette même portion étant remise en liberté au moment où l'on supprime la pile.¹

La quantité d'électricité emmagasinée, lors de la charge du condensateur, sous l'influence d'une force électromotrice donnée, ici celle de la pile α , dépend de la surface des plaques d' , de la nature de l'isolant qui sépare ces plaques l'une de l'autre (air ou toute autre matière isolante) et de l'épaisseur de cet isolant.

D'autre part, si, pour un condensateur donné, on fait varier la force électromotrice du courant de charge, on constate que la quantité d'électricité emmagasinée varie proportionnellement à cette force.

On appelle *capacité* C d'un condensateur, le rapport de la quantité emmagasinée Q à la force électromotrice E du courant de charge et l'on écrit :

$$C = \frac{Q}{E},$$

expression d'où l'on tire successivement :

$$Q = CE \quad \text{et} \quad E = \frac{Q}{C}.$$

Nous avons déjà vu à page 24 que l'unité pratique C. G. S. de capacité électrique a été appelée *farad*. C'est la capacité d'un condensateur (ou d'un conducteur quelconque), qui, chargé par une force électromotrice d'un volt, emmagasine une quantité d'électricité égale à un coulomb.

Le farad étant, pour les applications courantes de l'électricité, démesurément grand, on se sert le plus souvent du *microfarad* qui est égal, comme nous savons (voir p. 45), à la millionième partie du farad :

$$1 \text{ microfarad} = 1 \text{ farad multiplié par } 10^{-6}.$$

On calcule la capacité C d'un condensateur plan analogue à celui de la figure 89 au moyen de la formule

$$C = K \frac{S}{e},$$

dans laquelle S représente la surface du condensateur, K un coeffi-

¹ DEVAUX-CHARBONNEL, *État actuel de la Science électrique*.

cient dépendant de la nature de l'isolant séparant ses armatures et enfin e l'épaisseur de cet isolant. L'isolant d'un condensateur est appelé *diélectrique*.

Il y a intérêt à ce qu'un condensateur présente une grande surface d'armature, sa capacité augmentant proportionnellement à cette surface. Pour arriver à ce résultat, sans que le condensateur acquière



Fig. 90

de ce fait des dimensions d'encombrement exagérées, qui le rendraient peu maniable, on empile un certain nombre de plaques métalliques très minces, des feuilles d'étain, par exemple, que l'on isole les unes des autres par des feuilles de papier paraffiné, légèrement plus petites en surface que les feuilles d'étain. Les feuilles métalliques paires débordent d'un côté, les feuilles métalliques impaires de l'autre (fig. 90). Les paires sont toutes reliées ensemble et à l'une des bornes du condensateur ; les impaires sont de même toutes reliées ensemble et à l'autre borne. Chacune de ces deux séries constitue l'une des armatures du condensateur.

Nous avons vu tout à l'heure que la nature du diélectrique interposé entre les deux armatures influe sur la capacité du condensateur, et nous avons représenté par la lettre K le coefficient qui tient compte de cette nature. Il résulte de là que pour deux condensateurs ayant même surface S et même épaisseur de diélectrique et ne différant entre eux que par la nature de leur isolant, on pourra écrire :

$$C = \frac{KS}{e} \quad \text{et} \quad C' = \frac{K'S}{e}.$$

D'où l'on tire :

$$\frac{C'}{C} = \frac{K'}{K}.$$

Les coefficients K et K' sont ce qu'on appelle les *pouvoirs inducteurs spécifiques* des diélectriques en cause. On détermine leurs valeurs en les comparant à celle de l'air pris comme unité et alors on a le tableau suivant établi expérimentalement :

Solides		Liquides		Gaz
Paraffine . . .	2,1	Pétrole . . .	2	Hydrogène 0,9996
Caoutchouc . . .	2,2	Alcool . . .	25	Vide . . . 0,9994
Gutta-percha . .	4,0	Eau . . .	80	
Mica	8,0			
Verre blanc	5 à 10			

Différents groupements des condensateurs. — On peut grou-

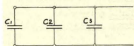


Fig. 91

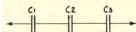


Fig. 92

per les condensateurs comme les éléments d'une pile voltaïque (p. 28). Quand plusieurs condensateurs C_1 , C_2 , C_3 , etc., sont réunis en *parallèle* (fig. 91), leur capacité totale C_t est égale à la somme des capacités individuelles et l'on a :

$$C_t = C_1 + C_2 + C_3 + \text{etc.}$$

Lorsque plusieurs condensateurs sont reliés en *série* selon la figure 92, leur capacité d'ensemble est donnée par la formule :

$$C_t = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \text{etc.}}$$

(comparer avec p. 34).

Lorsque tous les condensateurs intercalés en série sont égaux, on a simplement :

$$C_t = \frac{C}{n},$$

n étant le nombre des condensateurs égaux entre eux qui sont utilisés.

Energie fournie et restituée par un condensateur. — Nous avons vu que lorsqu'on charge un condensateur d'après la figure 88, le courant, après s'être établi pendant un court instant, diminue ensuite plus ou moins rapidement et enfin cesse tout à fait. On peut alors admettre que le condensateur agit comme une force contre-électromotrice qui s'oppose au courant de charge et qui, la charge une fois terminée, est égale à $\frac{Q}{C} = E$, soit à la force électromotrice de la pile.

Toutefois, la force contre-électromotrice dont le diélectrique est le siège passe, avant d'atteindre la valeur limite $E = \frac{Q}{C} = IR$, par une succession de valeurs e plus petites que E , à chacune desquelles correspond une intensité élémentaire i instantanée et par suite à une portion élémentaire q de la quantité d'électricité totale Q .

Or les énergies instantanées correspondant aux diverses valeurs de e , constituent par leur sommation l'énergie totale W emmagasinée par le condensateur, et comme ces énergies élémentaires varient régulièrement depuis zéro à QE (produit de la quantité d'électricité par la force électromotrice, p. 20), on a comme expression donnant la valeur de W :

$$W = \frac{1}{2} QE.$$

Le condensateur ne peut donc emmagasiner à la charge (respectivement restituer à la décharge) que la moitié de l'énergie fournie par la pile, l'autre moitié étant dissipée soit en chaleur (loi de Joule), soit sous d'autres formes complexes dans le diélectrique même.

En remplaçant Q par sa valeur CE dans la formule $W = \frac{1}{2} QE$, on a :

$$W = \frac{1}{2} CE^2,$$

expression qui permet de calculer l'énergie potentielle d'un condensateur quand on connaît sa capacité C et la force électromotrice E du courant de charge.

Admettons, par exemple, qu'on ait $E = 100$ volts et $C = 100$ microfarads ; le condensateur une fois chargé fournira une énergie de

$$W = \frac{1}{2} \times 100 \times 10^{-6} \times 100^2 = 0,5 \text{ joule,}$$

10^{-6} étant le facteur numérique permettant de passer du microfarad au farad.

Nous savons (p. 25) que pour passer de la notion de travail mécanique exprimé, par exemple, en joules, à celle de puissance exprimée en joules-secondes ou watts, il faut faire intervenir le temps.

Or le temps de décharge d'un condensateur est généralement très court. Comme, d'autre part, les quantités d'électricité qui sont

en jeu dans les faibles capacités que l'on emploie dans la technique des courants faibles, sont elles-mêmes très faibles, il est clair que les étincelles que fournit, à la décharge, une petite capacité, sont dues presque exclusivement à la valeur relativement très élevée de la force électromotrice E du courant de décharge.

Lorsqu'on charge, par exemple, avec une machine électrique à plateaux de verre (voir les manuels de physique) au potentiel de 27 000 volts environ, une petite sphère de laiton de un centimètre de rayon, la capacité de cette sphère étant égale à l'unité électrostatique (p. 137) qui vaut elle-même $\frac{1}{1\ 000\ 000}$ de microfarad,

l'application de la formule $Q = CE$ donne comme valeur de la quantité d'électricité correspondant à cette capacité et à ce voltage, trois centièmes de microcoulomb, et comme valeur de l'énergie en jeu, un demi-millième de joule ! Une bouteille de Leyde de 20 cm. de hauteur et 10 cm. de diamètre à la base constitue un condensateur dont la capacité est cent fois plus grande environ que celle de la sphère de un centimètre de rayon.¹

Actuellement, les condensateurs sont entrés dans le domaine de la technique des courants forts. On en construit qui peuvent supporter des voltages considérables tout en ayant de grandes capacités ; ils sont employés dans les réseaux de distribution de force et de lumière pour obtenir soit une protection plus efficace contre les décharges atmosphériques, soit une amélioration de rendement. Ces appareils sont, cela va de soi, beaucoup plus robustes que les condensateurs dont nous avons parlé jusqu'ici. Ceux qui ont été récemment construits et expérimentés par deux physiciens américains, MM. Wendt et Ivon, ont pu produire instantanément (en un cent-millième de seconde) l'échauffement jusqu'à 30 000 degrés, d'un fil de tungstène qui a éclaté alors avec un bruit comparable à celui de la foudre. L'énergie ainsi concentrée en un cent-millième de seconde correspond à près d'un million de chevaux-vapeur. On comprend que ce dernier chiffre est la conséquence non seulement des hauts voltages réalisés (100 000 volts à la charge) et de la grande surface du condensateur, mais encore et surtout de la fraction de seconde extrêmement petite pendant laquelle l'énergie emmagasinée est dépensée (note p. 25).

¹ DEVAUX-CHARBONNEL, *État actuel de la Science électrique.*

2^o Électrostatique.

Il y a une grande parenté entre les phénomènes de condensation électrique que nous venons d'étudier brièvement, et ceux de l'électrostatique. C'est pourquoi nous les réunissons côte à côte dans le présent chapitre V.

Dans ces deux espèces de phénomènes, en effet, on a affaire à des charges d'électricité dont les caractéristiques principales sont, un voltage très élevé, une décharge (passage du repos au mouvement) de durée extrêmement courte, la localisation de ces charges à la surface des conducteurs, et enfin l'électrisation instantanée des corps par influence.

En outre l'appareil si simple qu'est un condensateur existe toutes les fois que se trouvent en présence deux armatures de formes quelconques, séparées l'une de l'autre par un isolant ou diélectrique. Or ce cas est très fréquent : un câble télégraphique aérien souterrain ou sous-marin, constitué un condensateur dont l'une des armatures est l'âme en cuivre chargée de porter au loin le courant télégraphique, le diélectrique, l'enveloppe isolante de cette âme, et enfin l'autre armature, les corps plus ou moins conducteurs qui enveloppent le câble (fils de protection de cette enveloppe, eau de mer, masse de terre, fils voisins, etc.). Lorsqu'un corps isolé est chargé électrostatiquement (au moyen d'une machine à frottement, par exemple), il peut être assimilé, lui aussi, à l'armature d'un condensateur, dont l'air ambiant est le diélectrique et dont les murs du local où l'on opère, et tous les objets qui, s'y trouvant, sont reliés au sol (y compris éventuellement le corps de l'opérateur), forment la seconde armature.

Nous ne pouvons nous livrer ici à une étude détaillée des phénomènes électrostatiques, étude qu'on trouvera dans les manuels de physique. Par contre, nous jugeons utile de donner, dans ce qui suit, quelques renseignements complémentaires concernant le système des unités C. G. S. dont nous avons fait l'exposé au chapitre II.

Unités dites électrostatiques. — Nous avons vu à page 40 que la masse magnétique était définie, selon la loi de Coulomb, par la force qui s'exerce à la distance r entre deux masses magnétiques m et m' :

$$f = \frac{mm'}{r^2}.$$

Si dans cette formule on fait $m = m' =$ une unité C. G. S. de masse magnétique, et $r =$ l'unité C. G. S. de longueur $= 1$ centimètre, on a :

$$f = 1 \text{ dyne.}$$

Or la loi de Coulomb s'applique aussi à deux masses ou charges électriques telles qu'on les définit en électrostatique, parce que précisément ces charges (que nous désignerons par les lettres q et q' quantités d'électricité, pour les distinguer aisément de m et m' , masses magnétiques) s'attirent ou se repoussent proportionnellement à leur produit qq' et inversement proportionnellement au carré de la distance r qui les sépare, en sorte qu'on peut écrire électrostatiquement :

$$f = \frac{qq'}{r^2},$$

tout comme on a écrit électromagnétiquement :

$$f = \frac{mm'}{r^2}.$$

Dans les deux cas f est exprimé en dynes, unité C. G. S. de force, commune aux deux systèmes.

Le physicien Cornu a calculé, dans l'*Annuaire du Bureau des Longitudes* de 1902, que s'il était possible de concentrer une charge d'électricité égale à un coulomb, sur une sphère très petite placée à 1 cm. de distance d'une seconde sphère identique à la première et chargée, elle aussi, d'un coulomb, la force de répulsion (ou d'attraction) existant entre ces deux sphères minuscules serait, exprimée en dynes, par

$$3.10^9 \times 3.10^9 = 9.10^{18}$$

Or la dyne vaut approximativement un milligramme-force (p. 39) ou un millionième de kilogramme (1 dyne $= 10^{-6}$ kgr.). Nos 9.10^{18} dynes ci-dessus valent donc 9.10^{12} , soit 9 trillions de kilogrammes !

Le facteur numérique 3.10^9 par lequel nous avons dû multiplier la valeur de q (respectivement de q') pour passer du système C. G. S. électromagnétique au système C. G. S. électrostatique, est égal au dixième (p. 43) du nombre $3.10^{10} = 30\,000\,000\,000$ qui représente, en centimètres (unité C. G. S. de longueur), la distance que parcourt la lumière en une seconde. Cette même distance, exprimée en kilomètres (1 kilomètre $= 100\,000$ centimètres), est 300 000, chiffre qui est, en kilomètres-secondes, la vitesse de propagation des ondes lumineuses.

Le facteur 3.10^{10} est le rapport de deux nombres exprimant la même grandeur dans les deux systèmes électromagnétique et électrostatique. Si on les combine avec les nombres (multiples ou sous-multiples de 10) par lesquels il faut multiplier les unités électromagnétiques C. G. S. théoriques pour en déduire les valeurs correspondantes des unités pratiques (p. 43 et suiv.), on obtient le tableau suivant :¹

Unités pratiques		Unités électromagnétiques	Unités électrostatiques
(Résistance)	Ohm	10^9	$\frac{1}{9} \times 10^{-11}$
(Force él. m.)	Volt	10^8	$\frac{1}{3} \times 10^{-2}$
(Intensité)	Ampère	10^{-1}	3×10^9
(Quantité)	Coulomb	10^{-1}	3×10^9
(Capacité)	Farad	10^{-9}	9×10^{11}

Le fait que le nombre 3.10^{10} qui exprime la vitesse de la lumière, se retrouve dans les calculs relatifs aux phénomènes électrostatiques et de condensation, a amené les physiciens et les mathématiciens, et notamment Clerk Maxwell et Hertz, à conclure à l'identité de nature des ondes lumineuses et des ondes électriques (note p. 15 et 16).

¹ *Nota concernant le tableau ci-dessus.* Si dans la formule complète de Coulomb $f = k \frac{m m'}{r^2}$ déterminant la *quantité de magnétisme*, on fait le coefficient k égal à l'unité, on impose du même coup les unités avec lesquelles on doit mesurer les masses magnétiques et par suite aussi les unités électriques de R , E , I et C (p. 40 et suiv.) qui découlent de ces dernières, — et alors on a le système des unités C. G. S. dites *électromagnétiques*.

D'autre part, si dans la même formule complète de Coulomb $f = k' \frac{qq'}{r^2}$ déterminant la *quantité d'électricité*, on fait le coefficient k' égal à l'unité, on impose du même coup les unités avec lesquelles on doit mesurer les quantités d'électricité et par suite aussi les unités électriques de R , E , I et C qui découlent de ces dernières, — et alors on a le système des unités C. G. S. dites *électrostatiques*.

Les coefficients k et k' sont des constantes physiques qui dépendent du milieu interposé. Leur produit kk' est égal au carré de la vitesse de la lumière.

Les ondes électromagnétiques ou hertziennes.

Généralités. — Lorsque, après avoir chargé un condensateur au moyen d'une source d'électricité quelconque, on le sépare de cette dernière, il conserve une certaine charge. Nous pouvons le décharger en réunissant par un fil conducteur ses deux armatures, et alors ce fil devient le siège d'un courant dont le sens est l'inverse de celui du courant de charge (p. 131).

Il semble que ce courant de décharge (dont la durée est, comme nous savons, très courte en général) devrait, une fois fini, ramener les deux armatures à l'état neutre (non électrisé). Tel n'est pas le cas ; on observe qu'en vertu de la vitesse acquise, le courant de décharge *dépasse* le point où les armatures sont revenues à l'état neutre et les charge à son tour, mais cette fois en sens inverse. Ce phénomène qui, pour une même décharge, peut se répéter plusieurs

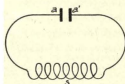


Fig. 93.

fois de suite, se manifeste avec une intensité relativement grande, lorsque dans le circuit du fil réunissant les deux armatures *a* et *a'* (fig. 93), se trouve intercalé un solénoïde *s* qui du fait des spires de fil isolé dont il est formé, possède une certaine self-induction (p. 121). Le circuit *aa's* de la figure 93 devient ainsi le

siège de courants alternatifs, qui se succèdent avec une grande rapidité et dont l'amplitude va en s'affaiblissant, si bien que leur courbe sinusoïdale prend la forme indiquée dans la figure 86 (p. 129) ; on a affaire à un *courant oscillatoire amorti*.

La fréquence d'un tel courant est d'autant plus grande que la capacité du condensateur et la self-induction de la bobine *s* sont elles-mêmes plus petites. L'amortissement est d'autant plus rapide que la résistance ohmique du circuit est plus grande.

Lorsque cette résistance dépasse une certaine limite, la forme

oscillatoire disparaît, et le circuit n'est plus parcouru que par un seul et unique courant de décharge.

Il résulte de ce qui précède que la capacité aa' et la self s de la figure 93 peuvent être réglées par l'expérimentateur de manière à produire des oscillations *lentes* (aa' et s toutes deux grandes), ou *rapides* (aa' et s toutes deux petites).

L'échelle des fréquences que l'on peut ainsi obtenir peut aller depuis cent jusqu'à cinquante milliards d'oscillations par seconde. On comprend dès lors les mots de *haute fréquence* au moyen desquels on caractérise ces espèces de courants.

Dispositif de Tesla. — Ce dispositif est représenté dans la figure 94. aa' sont les armatures d'un condensateur ; s est une bobine de self, bb les bornes

du fil secondaire d'une bobine de Ruhmkorff et enfin c et c' sont deux petites sphères métalliques, qui, placées à une faible distance l'une de

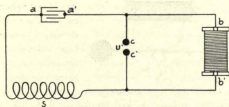


Fig. 94

l'autre, portent le nom d'*éclateur*, parce que c'est entre elles qu'éclatent les étincelles en vue desquelles Tesla a construit son appareil.

Nous savons que dans le circuit très résistant que constitue le secondaire de la bobine de Ruhmkorff, les oscillations électriques ne peuvent avoir lieu, et alors la charge du condensateur se fait progressivement. A un moment donné, la différence de potentiel entre c et c' de l'éclateur est devenue assez grande pour qu'une étincelle éclate en effet là, rendant conductrice la tranche d'air u' ; il en résulte la décharge instantanée et oscillante de l'énergie emmagasinée dans aa' ;

on a ainsi une première émission d'ondes amorties semblables à celles de la figure 86 de la page 129. Mais, comme

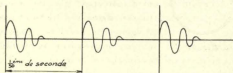


Fig. 95

le primaire de la bobine de Ruhmkorff peut travailler à raison d'au moins 50 interruptions par seconde, nous aurons en cc' une succession de 50 étincelles par seconde dont chacune provoquera dans

l'éther ambiant, une émission d'ondes. L'ensemble de ces émissions pourra alors être représenté comme l'indique la figure 95, où chacun des traits verticaux répartis à raison d'un cinquantième de seconde sur la ligne des abscisses, ou ici des temps, est lui-même l'origine d'un train d'ondes amorties. Quant au nombre des ondes de chaque émission, ou mieux dit, leur fréquence qui, ainsi que nous l'avons vu tout à l'heure, ne dépend que du produit de la capacité aa' par la self s , elle atteignait, dans les premières expériences de Tesla, plusieurs centaines de mille par seconde.

Excitateur de Hertz. — Hertz est arrivé à porter cette fréquence à plusieurs milliards par seconde, en disposant l'éclateur de son

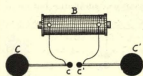


Fig. 96

excitateur comme l'indique la figure 96. Deux sphères C et C' de même rayon (ou deux plaques métalliques de même surface) sont reliées par une tige conductrice CC' au milieu de laquelle on a ménagé une coupure armée de deux petites boules métalliques c et c' soigneusement polies et mises en communication avec les bornes du secondaire de la bobine de Ruhmkorff B . Les grandes sphères C et C' à forte capacité jouent ici un rôle analogue à celui du condensateur de Tesla.

Résonnateur de Hertz. — On constate que dans tout l'espace où un excitateur de Hertz est en activité, des étincelles jaillissent entre deux objets quelconques en métal, sans que ceux-ci soient reliés par un fil conducteur avec les boules cc' de l'éclateur.

Pour étudier ce phénomène, Hertz imagina son résonnateur dont la figure 97 donne l'aspect, et qui consiste en un fil métallique recourbé en forme de cercle, dont la coupure est constituée d'une part par une boule, et d'autre part par une pointe mobile réglable au moyen d'une vis. Celle-ci permet de diminuer ou d'augmenter à volonté l'épaisseur de la coupure et par conséquent la distance d'éclatement de l'étincelle.



Fig. 97

Un jeu de ces résonnateurs, de dimensions différentes, permit à Hertz de constater qu'en un point donné de l'espace environnant l'excitateur, l'étincelle la plus longue était obtenue au résonnateur, quand celui-ci avait une grandeur donnée. Avec un résonnateur de bonnes dimensions, Hertz put obtenir des étincelles de 7 à 8 mm.

de longueur, dans les régions immédiatement voisines de l'excitateur. A 15 ou 20 mètres de distance, les étincelles étaient beaucoup plus faibles, bien qu'encore visibles.

De là à conclure que l'excitateur constitue un *centre d'ébranlement vibratoire* dont les ondes se propagent dans toutes les directions à la manière des ondes sonores dans l'air, ou, mieux encore, à celle des ondes lumineuses dans l'éther, il n'y avait qu'un pas qui fut rapidement franchi par Hertz et qui l'amena à dire que le milieu vibrant est l'éther aussi bien pour les ondes électriques que pour les ondes lumineuses ; celles-ci, dès lors, peuvent être considérées comme étant un cas particulier de celles-là (note p. 15 et 16). Les ondes électriques se propagent à travers les corps mauvais conducteurs ; les murs d'une salle et d'un bâtiment ne les arrêtent pas ; elles franchissent des couches d'air très étendues, ce qui a permis de les employer, avec un succès croissant, à la transmission des signaux télégraphiques et téléphoniques sans fil et à toutes distances.

On a pu reproduire avec les ondes hertziennes, la plupart des phénomènes lumineux de réflexion, de réfraction, d'interférence, de polarisation, etc. Enfin et surtout, on a constaté que la vitesse de leur propagation était identique à celle de la lumière, soit 300 000 kilomètres par seconde.

Les ondes hertziennes présentent toutefois cette particularité qu'elles sont, en moyenne, dix mille fois moins rapides que celles de la lumière et qu'elles ont par conséquent des longueurs d'onde plus grandes en proportion.

La longueur λ d'une onde quelconque est reliée, d'une part, à la durée t d'une oscillation et, d'autre part, à la vitesse v de propagation, par la formule :

$$\lambda = vt.$$

La longueur moyenne des ondes lumineuses, dont la fréquence moyenne (leur fréquence varie quelque peu selon les différentes couleurs du spectre) est de 50 milliards $\times 10\,000 = 5 \times 10^{14}$ environ, est de l'ordre du demi-millième de millimètre.

Les plus petites longueurs d'ondes électriques expérimentées par Hertz ont été de 6 mm. environ. Actuellement, on emploie en télégraphie sans fil des longueurs d'ondes variant entre 300 et 23 000 mètres.

Ondes électriques entretenues. — Nous avons vu que les ondes électriques oscillantes produites par la décharge d'un condensateur sont *amorties*, autrement dit que chaque train d'ondes est

constitué par une succession d'ondes à amplitude décroissante. Nous verrons plus loin qu'en T. S. F. il y a intérêt à envoyer dans l'espace tantôt des ondes amorties (dont on n'utilise alors que la première, celle qui a la plus grande amplitude dans chaque train), tantôt des ondes *entretenues*. Pour obtenir celles-ci on substitue ordinairement à la bobine de Ruhmkorff, des alternateurs mécaniques à grande vitesse, qui produisent à eux seuls des fréquences de 30 000 périodes (Station T. S. F. de Saint-Assise, près Paris). On peut aussi employer des alternateurs à basse fréquence, tels que ceux d'un secteur de distribution de force et de lumière, dont on augmente la période au moyen d'un transformateur statique.

Télégraphie et téléphonie sans fil.

Poste d'émission. — L'excitateur de Hertz, tel qu'il est représenté dans notre figure 96, ne peut pas être utilisé avec grand profit comme émetteur d'ondes T. S. F. Grâce à la capacité insuffisante des boules, grandes et petites, de son éclateur, il n'enverrait au loin dans l'espace environnant que des quantités d'électricité très faibles. Pour arriver dans ce sens à un résultat meilleur, il faut, d'une part, compléter le circuit par un condensateur, ce qui nous ramène au dispositif de Tesla et assure la production d'ondes oscillantes, d'autre part, augmenter la capacité en mettant en relation le circuit oscillateur avec ce qu'on appelle une *antenne* (Marconi), c'est-à-dire avec un fil isolé tendu à une hauteur suffisante au-dessus du sol du poste émetteur. La liaison du circuit de l'éclateur se fait généralement par l'intermédiaire d'un transformateur. On obtient alors le schéma de la figure 98 dans laquelle c'est une bobine de Ruhmkorff qui est employée comme source de courant. La capacité de l'antenne, surtout lorsque celle-ci plonge très haut dans l'atmosphère, est considérable. L'extrémité inférieure est reliée à la terre à travers le secondaire du transformateur.

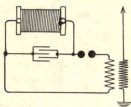


Fig. 98

L'énergie rayonnée dans l'espace par l'antenne de Marconi est beaucoup plus grande, toutes choses égales d'ailleurs, qu'avec le simple dispositif de Hertz, et cela d'autant plus que la période d'oscillation propre de l'éclateur est *en accord* avec celle de l'antenne.

Quel que soit le mode d'excitation adopté pour les ondes électriques, que celles-ci soient amorties ou entretenues, l'émission des

signaux télégraphiques se fait, selon le système bien connu de Morse (traits et points), au moyen d'un manipulateur ou levier-clé qui est intercalé, soit dans le circuit primaire de la bobine de Ruhmkorff, soit dans celui de l'alternateur. Chaque abaissement de ce levier par la main de l'opérateur télégraphiste provoque l'émission de trains d'ondes dont chacun correspond, comme nous savons, à une étincelle de l'éclateur et qui sont propagées dans le milieu vibrant entourant l'antenne. Les signaux Morse se composent chacun d'un

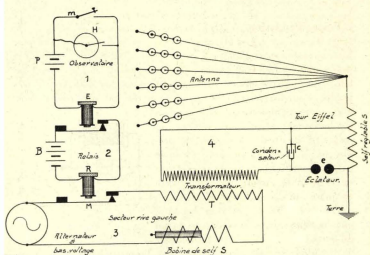


Fig. 99

ou de plusieurs des deux signes élémentaires, trait ou point. Le trait est égal à trois points, l'espace entre les traits et les points d'une même lettre est d'un point ; l'espace entre les lettres est d'un trait et entre les mots de cinq points.

La figure 99 donne, d'après le professeur Bouasse (*Pendule, Spiral, Diapason*, tome II), le schéma des appareils d'émission qui furent installés, au début de la T. S. F., partie à l'Observatoire de Paris, partie dans la Tour Eiffel, pour distribuer les *signaux dits horaires* dont nous parlerons à la fin de notre partie pratique.

L'Observatoire de Paris étant à une certaine distance de la Tour Eiffel, a été relié avec celle-ci au moyen d'un câble à deux conduc-

teurs. Le circuit *I* de notre figure 99 contient, d'une part, les instruments placés dans l'Observatoire, à savoir, la pile *P*, le levier-clé à main *m* et la pendule *H* munie d'un interrupteur automatique intercalé en parallèle avec *m*, et, d'autre part, l'électro-aimant *E* placé dans la Tour.

L'armature de *E* commande, par son interrupteur automatique, un second circuit *2* renfermant la pile *B* et l'électro-aimant de relai *R* dont l'armature actionne l'interrupteur *M* des émissions radio-télégraphiques. *M* commande ainsi le circuit *3* renfermant l'alternateur à bas voltage du secteur de distribution de la Rive gauche de la Seine, la bobine de self *S* et le fil primaire d'un transformateur *T*. Enfin le circuit *4* comprend lui-même le secondaire du transformateur, le condensateur *c*, l'éclateur *e*, la self réglable *s*, reliée d'un côté à l'antenne et de l'autre à la terre. On voit que l'antenne se compose de plusieurs fils isolés se concentrant sur la self d'antenne *s*, que l'on peut faire varier à volonté dans des proportions déterminées, et avec elle la capacité de l'antenne elle-même.

On comprend immédiatement, en examinant la figure 99, que chaque fermeture du circuit *I* opérée soit manuellement par le levier-clé *m*, soit automatiquement par l'horloge *H*, a pour effet de lancer dans l'antenne d'émission et par elle dans toutes les directions de l'espace ambiant, des trains d'ondes hertziennes. L'opérateur télégraphiste agissant sur *m* pourra donc envoyer, selon le code Morse, des lettres, mots et phrases qui à leur tour pourront être soit des signaux d'avertissement précédant les signaux horaires proprement dits, soit des nouvelles de presse, soit enfin des bulletins météorologiques. Par contre, c'est la pendule *H* de l'Observatoire de Paris qui, remise à l'heure exacte d'après les observations astronomiques, enverra les signaux horaires proprement dits à des instants du jour ou de la nuit prédéterminés et connus de tous ceux que cela peut intéresser.

Expliquons maintenant comment et au moyen de quels appareils, ces signaux sont reçus et utilisés aux postes d'arrivée.

Postes T. S. F. de réception. — Il est bon de remarquer tout d'abord que le nombre des postes de réception des ondes hertziennes lancées par la station émettrice peut être très grand, puisque chacune de ces ondes se propage *sphériquement* tout autour du centre de vibration que constituent l'éclateur et son antenne. Il résulte de là que les signaux de la Tour Eiffel, par exemple, peuvent être captés en n'importe quel point terrestre, maritime ou même atmosphérique (avions,

dirigeables, etc.) muni d'un poste de réception. Cette possibilité de captation est limitée toutefois :

- a) par la puissance de la station d'émission ;
- b) par l'état plus ou moins favorable de l'atmosphère ;
- c) par la sensibilité des appareils récepteurs.

Nous ne nous occuperons ici que du point c) ci-dessus.

Chaque poste de réception doit être muni, en premier lieu, d'un organe capable de capter les ondes hertziennes de la station émettrice. A l'origine de la T. S. F., cet organe a été presque exclusivement une antenne analogue à celle du poste émetteur qu'on appela alors *antenne réceptrice*.

La portion du flux de force total lancée par l'antenne émettrice, qui atteint une antenne réceptrice, présente les caractères suivants :

- 1^o Elle est elle-même un flux de force ayant même fréquence que le flux émetteur ;
- 2^o Elle est d'autant plus faible que l'antenne réceptrice est plus éloignée de l'antenne émettrice ;
- 3^o Elle agit non seulement sur l'antenne réceptrice, mais aussi sur les conducteurs voisins en relation avec le sol (toitures, gouttières, cheminées métalliques, etc.).

Si donc l'on veut que ce soit l'antenne réceptrice et les instruments auxquels elle est reliée, qui recueillent la plus grande partie du flux reçu, il faut : a) l'isoler le mieux possible ; b) l'installer à une hauteur suffisante au-dessus du sol pour qu'elle soit dégagée de la concurrence des masses métalliques voisines ; enfin c) la diriger horizon-

talement vers l'antenne de la station émettrice dont la situation géographique doit être alors connue.

Toutefois la condition c) n'a une réelle importance que lorsque l'on veut recevoir, avec un minimum de fil d'antenne et un maximum d'intensité, les seules ondes électriques

d'une station émettrice connue, telle, par exemple, que la Tour Eiffel.

Si, au contraire, on désire recevoir indistinctement les ondes de n'importe lequel des nombreux postes émetteurs qui sont répartis en divers points de la surface terrestre, on emploiera une antenne verticale.

Au point de vue d'un bon rendement, il y a intérêt à accorder la

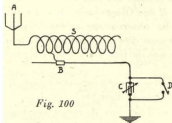


Fig. 100

période d'oscillation des ondes reçues avec celle des ondes émises. Cet accord existe quelquefois de prime abord lorsque l'onde propre de l'antenne réceptrice est précisément égale en longueur à celle de l'onde reçue ou à recevoir. Il se produit alors un phénomène de *résonance* analogue à celle que provoque à l'oreille le placement d'un diapason vibrant sur une caisse de bois dont le volume d'air (ou, mieux dit, la capacité intérieure), a été réglé de manière à obtenir le maximum d'intensité de son. Ce maximum a lieu lorsque par un réglage approprié, on a réussi à donner à la masse d'air contenue dans la caisse, une période de vibration égale à celle du diapason. De même avec une antenne réceptrice ayant même longueur d'onde propre que l'onde reçue, la résonance se produit, et a pour effet de donner le maximum d'amplitude et par conséquent aussi le maximum d'intensité aux ondes actionnant les appareils récepteurs proprement dits.

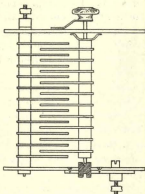


Fig. 101

Lorsque la longueur d'onde propre de l'antenne réceptrice diffère de celle de l'onde reçue, elle est ou trop grande ou trop faible. On l'allonge en intercalant entre l'antenne *A* et la terre une bobine de self *S* variable à volonté (fig. 100). Le contact curseur *B*, déplacé à la main vers la droite, permet d'ajouter au circuit d'antenne un plus grand nombre de spires et d'allonger d'autant l'antenne et sa longueur d'onde propre. On raccourcit par contre celle-ci en intercalant, entre terre et curseur, un condensateur variable *C* que commande l'interrupteur à main *D*. On arrive rapidement à l'accord en manœuvrant *B*, *C* et *D*, jusqu'à ce que la résonance cherchée soit obtenue. Le condensateur variable *C* devra être à diélectrique d'air à lames tournantes tel que le représente la figure 101 ci-contre, que nous empruntons au bel ouvrage de M. Joseph Roussel, intitulé : *Le Livre de l'Amateur de T. S. F.*

Poste de réception à téléphone. — C'est un récepteur téléphonique du type Bell qui, mis à l'oreille, permet de recevoir les trains d'ondes de la station émettrice, sous la forme de signaux Morse. La lecture se fait ainsi au son.

Toutefois, ces signaux ne pourraient pas être reçus en intercalant le téléphone directement dans le circuit même de l'antenne réceptrice, la fréquence trop élevée des ondes qui composent ces signaux dépassant de beaucoup celle des sons que l'oreille humaine peut percevoir. Pour abaisser cette fréquence, on a recours à un appareil intermédiaire qu'on a appelé *détecteur* et qui, à l'instar d'une soupape Nodon (p. 74, fig. 40), supprime l'une des alternances du courant d'ondes. Ce courant est ainsi remplacé, à la sortie du détecteur, par une succession de courants distincts, tous de même sens, dont la fréquence devient *audible*, leur durée n'étant plus celle d'une onde, mais celle bien plus considérable d'un train d'ondes, lorsque celles-ci sont du type amorti. La présence du détecteur a en outre pour effet d'augmenter l'intensité moyenne du courant reçu.

Depuis le début de la T. S. F., un grand nombre de détecteurs ont été proposés et appliqués. Le professeur Mazotto en a donné la liste et l'historique dans son ouvrage : *La Télégraphie sans fil* (traduit par J.-A. Montpellier ; V^e Ch. Dunod, éditeur, Paris).

Nous ne parlerons ici que de trois d'entre eux qui ont la valeur de types et qui sont :

le détecteur à cristal ;

le détecteur électrolytique (voltamètre à électrodes inégales) et enfin,

le détecteur à valve.

Le *détecteur à cristal* est, en principe, constitué par le point de

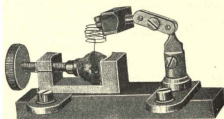


Fig. 102

contact d'une tige métallique peu oxydable, à la fois rigide et souple (pratiquement un fil de laiton enroulé en spirale, aplati à son extrémité et disposé de manière à permettre l'exploration facile du meilleur

point de contact et de la meilleure pression entre pointe et cristal). La figure 102, empruntée par M. Roussel au catalogue d'Ernest Roger (Ateliers Ducretet à Paris, 75, rue Claude Bernard), donne l'aspect d'un bon détecteur à cristal.

Le cristal qui a donné, pendant la guerre de 1914-1918, les meilleurs résultats est celui de *galène* (sulfure de plomb).

Le *détecteur électrolytique* du type Ferrié est représenté en fig. 103 (voir aussi BOUASSE, *Pendule, Spiral, Diapason*, Tome II). Il consiste en un vase rempli d'une solution aqueuse d'acide sulfurique dans laquelle est immergé en partie un tube en verre *T* à l'extrémité inférieure duquel est soudé un fil de platine très fin *c* qui émerge au ras du verre, d'un côté, et de l'autre est relié, au moyen d'un peu de mercure, avec l'un des fils du circuit extérieur *F*. L'autre fil extérieur *F'* est le prolongement d'un second fil de platine à forte section et tordu en spiral.

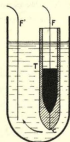


Fig. 103

Si on relie la fine électrode *c* par *F* avec le pôle positif d'une pile, une mince couche d'oxyde se formera à sa partie inférieure et produira là une force contre-électromotrice de polarisation (p. 68). Mais sous l'influence des ondes hertziennes, cette polarisation est détruite et alors le courant de la pile peut passer ; par contre, ce courant de pile cesse, de nouveau contre-balancé par celui de polarisation, aussitôt que les ondes elles-mêmes cessent.

Le *détecteur à valve*, tel qu'il a été appliqué au début par M. de Forest, sous le nom d'*audion*, est basé sur l'*effet Edison*, dont la figure 104 donne une idée schématique.

Si dans l'ampoule d'une lampe à incandescence Edison, dont le filament est alimenté par une source de courant d'environ 70 volts, on place en regard du filament une électrode *a* que l'on relie à travers un galvanomètre *b* au pôle positif de la pile de 70 volts, on constate la présence, dans le circuit du galvanomètre, d'un courant dont le voltage est d'environ 35 volts, soit de la moitié de celui de la pile, et dont l'intensité peut atteindre un ampère par centimètre carré de surface du filament.

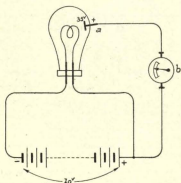


Fig. 104

Ce courant est dû à des particules électrisées animées de vitesses énormes, qui se détachent du filament incandescent et sont projetées

contre l'électrode *a*. L'un des effets de ce transport de particules, de ce bombardement comme on l'appelle aussi, qui a d'ailleurs lieu même en l'absence de *a*, est le noircissement de la surface intérieure du verre de l'ampoule, noircissement que chacun peut constater (surtout lorsque le filament est en charbon). Un autre effet est de rendre conducteur l'espace compris entre le filament et l'électrode *a* de la figure 104, ce qui explique le passage du courant dans le circuit du galvanomètre.

Or, M. de Forest a constaté que lorsque ce même espace est soumis aux oscillations hertziennes, soit au moyen de spires de fil entourant l'ampoule et aboutissant à l'antenne réceptrice, soit au moyen de deux plaques comprenant la lampe et mises en communication l'une avec l'autre, l'autre avec le sol, les oscillations hertziennes agissent sur les particules électrisées (que l'on appelle *electrons* et qui sont chargées négativement parce qu'elles sont plus mobiles que celles, positives, qui restent retenues dans le filament), en retardant et accélérant successivement leur mouvement.

Le courant circulant entre électrode et filament éprouve ainsi des variations et filament éproouve ainsi des variations

l'oreille au moyen d'un téléphone.

Le détecteur du type *audion* est devenu le chef de file d'une série

de perfectionnements qui, survenus pendant la guerre de 1914, ont contri-

bué à donner à la T. S. F. le magnétique

développement auquel elle est actuel-

lement parvenue. Les valves électro-

ioniques, appelées couramment : *tubes*

à vide, valves à *plusieurs électrodes*, ou

simples aussi *lampes*, et dont nous

nous occuperons plus loin, sont toutes

des descendantes de l'*audion* de M. de

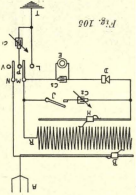
Forest.

Revenons à notre poste de réception

T. S. F. avec détecteur et téléphone.

Lorsque le détecteur est à cristal, le téléphone ou, comme on dit couramment, l'*écouteur* est simplement mis en série avec lui et il n'y

A, antenne; T, terre; B, curseur de primaire (BH, self primaire); H, courbe de secondaire (HH, self secondaire); J, commutateur du circuit périodique; D, détecteur; E, condensateur; MN, manette de mise en série, parallèle ou hors circuit du condensateur de terre; C₁, C₂, condensateurs variables à air; C₃, condensateur fixe.



a point de pile locale. Cette dernière est au contraire nécessaire lorsque le détecteur est soit électrolytique, soit à valve.

La figure 105, tirée de l'ouvrage de M. Roussel, donne le schéma d'un poste de réception avec détecteur à cristal, monté en *Oudin*.

Les indications contenues dans le texte placé au-dessous de la figure rendent celle-ci compréhensible. Complétons-les au moyen des remarques suivantes :

Le circuit *primaire* antenne-terre est constitué par l'antenne *A*, la self primaire variable *BR*, les commutateurs à main *MNLPV*, le condensateur variable à air *C₁*, et enfin la terre *T*. On retrouve ici les divers éléments de notre figure 100 qui permettent d'*accorder* le mieux possible l'antenne réceptrice avec une onde reçue de longueur quelconque.

Le circuit *secondaire* de réception proprement dite consiste dans le curseur *H*, la self variable secondaire *HR*, deux dériviations dont l'une comprend un condensateur variable à air *C₂* et son interrupteur à main *J*, et l'autre le détecteur *D*, l'écouteur *E* avec son condensateur fixe *C₃* (à papier paraffiné) et enfin la terre *T* commune à tout le système.

Voici comment l'opérateur procède, au moment où une réception doit se faire :

Il cherche tout d'abord le point sensible du détecteur à cristal, au moyen d'un vibreur d'essai appelé *buzzer* qui est analogue à une sonnette électrique trembleuse et qu'on actionne avec deux ou trois éléments de pile. Placé près du poste, le buzzer émet de courtes ondes amorties qu'un manipulateur permet de faire ronfler et qui sont entendues dans l'écouteur *E*.

On déplace alors le point de contact du cristal avec sa tige, jusqu'à ce que la membrane du téléphone donne le maximum d'intensité de son.

Ensuite, ayant mis l'interrupteur *J* sur position ouverte et le curseur *H* au milieu approximativement de la bobine de self, on règle le condensateur de terre *C₁* au maximum de sa capacité et on cherche par un déplacement du curseur *B* le minimum de self qui, intercalé dans le primaire, donne le maximum d'intensité

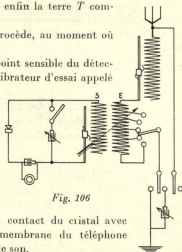


Fig. 106

de son, le condensateur C_2 étant lui-même au minimum de capacité.

Cela fait, on ferme J , ce qui transforme le circuit d'écoute qui auparavant était en *apériodique*, en circuit de *résonnance* ; on réalise ainsi la *syntonie*, autrement dit l'accord entre la période propre de l'antenne réceptrice et celle de l'onde reçue.

Enfin, si au moment où J a été fermé, on constate l'affaiblissement ou même la disparition des signaux du poste émetteur, on retrouve facilement ceux-ci en déplaçant le curseur H vers la droite (diminution de la self secondaire HR) et en réglant en conséquence la capacité du condensateur variable C_2 . Le poste est alors en état de réception parfaite.

La *syntonie* est le mieux atteinte lorsqu'on fait varier self et capacité du secondaire de telle façon que, le produit de ces deux facteurs restant constant, la self soit maximum et la capacité minimum.

Toutefois, la partie HR de la bobine de self étant commune aux deux circuits (primaire et secondaire) constitue ce qu'on appelle leur *couplage*. Or ce couplage peut être rendu plus *lâche* en diminuant HR et en compensant cette diminution par une augmentation correspondante de C_2 . Le relâchement du couplage, souvent utile, affaiblit l'intensité des signaux, mais isole ceux-ci de ceux d'autres postes émetteurs.

Le montage en Oudin de la figure 105 est celui dont M. Roussel

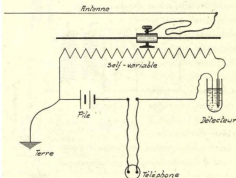


Fig. 107

recommande l'emploi aux amateurs de T. S. F. qui se contentent de recevoir les signaux de la Tour Eiffel ou de deux ou trois autres postes émetteurs européens (Nauen, Poldhu, etc.). Les signaux de ces divers postes sont en effet facilement reconnaissables, même en couplage serré.

Par contre, lorsqu'il s'agit d'opérer, à l'écoute, le triage des signaux d'un plus grand nombre de postes émetteurs, il faut avoir recours à un mode de couplage pouvant se relâcher jusqu'au voisinage de zéro,

car il est préférable d'entendre un peu moins fort le poste émetteur qui intéresse, que d'entendre très fort plusieurs postes gênants.

On emploiera alors avec avantage le montage en *Tesla* que représente la figure 106 et qui ne diffère du montage en Oudin que par la présence d'un couplage à deux enroulements *E* et *S* dont on peut augmenter ou diminuer l'induction mutuelle soit en faisant varier la longueur active de l'un d'eux (ici le primaire *E*), soit en inclinant plus ou moins leurs axes l'un par rapport à l'autre.

Lorsque le détecteur est du type électrolytique (Ferrié), il faut insérer dans son circuit la pile (dite de polarisation), avec laquelle le téléphone écouteur est mis en série. La figure 107 représente un poste de réception T. S. F. de ce type.

Poste de réception T. S. F. avec enregistreur Morse. — Avant de passer aux postes à *lampes* qui feront l'objet du paragraphe suivant, nous devons dire ici deux mots d'un type de détecteur qui a été

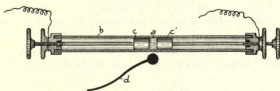


Fig. 108

appliqué l'un des premiers à la T. S. F. sous le nom de *cohéreur* ou *tube de Branly* et qui a ceci de remarquable qu'il a permis d'emblée la réception des signaux Morse, non pas seulement sur un écouteur téléphonique, mais bien sur la bande de papier d'un récepteur télégraphique enregistreur.

Ce cohéreur que représente notre figure 108 est basé sur le fait qu'une colonne de limaille métallique *a* enfermée dans un tube cylindrique *b* vide d'air, entre deux pistons conducteurs *c* et *c'* présente, en temps ordinaire, une résistance ohmique considérable, mais devient brusquement conductrice lorsqu'elle est frappée par des ondes hertziennes. L'effet de ces ondes une fois passé, un léger choc donné au tube par un *frappeur d* rétablit instantanément la résistance primitive de la limaille.

La figure 109 donne le montage de principe d'un poste de réception avec cohéreur tel que Marconi, l'inventeur de la T. S. F., l'a employé au début.

Légende : *a*, antenne ; *b*, cohéreur ; *t*, terre ; *p*, pile du relais *R* ;

p' , pile du circuit secondaire du relais ; ce circuit comprend l'électro-aimant du Morse enregistreur M et celui du frappeur F .

En temps ordinaire, le courant de p très affaibli par la résistance du cohéreur, est incapable d'actionner le relais R ; mais lorsque sous l'effet d'une onde hertziennne, cette résistance diminue, le courant intensifié attire brusquement l'armature de R qui

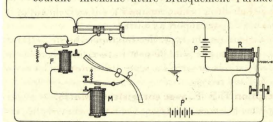


Fig. 109

ferme alors le circuit secondaire, le Morse M enregistre sur sa bande le signal correspondant et le frappeur F dé-

cohère aussitôt le tube à limaille qui reprend sa résistance primitive.

Lorsque le cohéreur b reçoit une série d'ondes hertziennes, le récepteur Morse enregistre sur sa bande une file de points très rapprochés qui ont l'aspect d'un trait ou d'un point Morse.

La T. S. F. par lampes.

Nous avons vu à page 151 que les lampes employées en T. S. F., sont basées, comme l'audion de de Forest, sur l'effet Edison. Si, modifiant quelque peu la disposition de la figure 104, nous relions l'électrode latérale d'une lampe à incandescence Edison avec une forte pile M (fig. 110) distincte de la pile N qui alimente le filament F ,

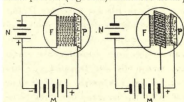


Fig. 110

Fig. 111

cette électrode P , à laquelle on donne en T. S. F. le nom de *plaque*, se trouve sur le trajet des électrons négatifs arrachés du filament lorsque celui-ci est porté à l'incandescence par le courant de la pile N . Ces électrons sont ainsi transportés à travers l'es-

pace filament-plaque (espace qui, ne l'oublions pas, est le vide poussé très loin, soit à quelques millièmes de millimètres de pression), avec une vitesse de plusieurs dizaines de mille kilomètres par seconde.

Si la plaque P est reliée, comme l'indique la figure 110, avec le pôle $+$ de la pile M , elle attire les électrons, puisque ceux-ci sont négatifs, et alors l'espace FP de l'ampoule est le siège d'un déplacement continu de charges électriques venant sans cesse neutraliser la charge positive de la plaque P . Pour qu'il en soit ainsi, la pile M devra fournir constamment de l'énergie sous la forme d'un courant électrique passant par le fil MP et que décèlerait un milliampèremètre intercalé sur le circuit $M+PFM$. Par contre, si la plaque P est brusquement reliée au pôle $-$ de M , les électrons négatifs arrachés de F sont repoussés par la plaque P , devenue elle-même négative, et aucun courant ne passerait plus dans le milliampèremètre.

Introduisons maintenant, entre le filament F et la plaque P de la figure 110, une troisième électrode percée de trous et affectant ainsi la forme d'une grille, on constatera que la présence de cette grille n'aura pas pour effet d'arrêter les électrons qui continueront, toutes autres choses égales d'ailleurs, à passer de F à P à travers les trous de la grille (fig. 111).

Enfin, si on relie par un fil passant à travers la paroi de l'ampoule (toujours vidée d'air), la grille G tantôt avec le pôle négatif d'une troisième source de courant O (fig. 112) tantôt avec son pôle positif (fig. 113), on constate qu'en laissant par contre la plaque P en liaison permanente avec le pôle positif de la pile M , on peut tantôt établir (fig. 113), tantôt arrêter (fig. 112) le transport des électrons (représentés ici par un faisceau de lignes ponctuées), à la hauteur de la grille G .

Toutefois, il y a entre ces deux extrêmes : arrêt complet du courant des électrons et passage avec l'intensité maximum possible, divers degrés intermédiaires que l'on peut réaliser en faisant varier les intensités des deux courants électriques fournis l'un par la pile M de plaque, l'autre par la pile O de grille.

En résumé, suivant la charge de la grille et par conséquent selon la valeur (positive ou négative) de la force électromotrice de la pile de grille O , le courant de déplacement des électrons arrachés du filament F sera fort, faible à divers degrés, ou même nul.

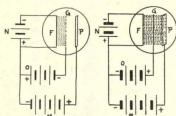


Fig. 112

Fig. 113

La figure 114 donne en volts la valeur variable des piles *M* et *O* que l'on peut contrôler au moyen de deux milliampèremètres *A* et *A'*.

Quant au filament *F* de la lampe, il est chauffé par une pile fixe de 4 volts.

Le tableau suivant, emprunté à l'ouvrage de M. Pierre Louis, *La T. S. F. par les tubes à vide*, indique de quelle manière varient les intensités des deux courants qui circulent, d'une part, dans le circuit plaque-filament, d'autre part, dans le circuit grille-filament, lorsque le potentiel de la grille varie de -30 volts à $+30$ volts par rapport à l'extrémité négative du filament.

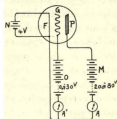


Fig. 114

Potentiel de la grille par rapport à l'ex- trémité négative du filament	Courant dans le circuit		Potentiel de la grille par rapport à l'ex- trémité négative du filament	Courant dans le circuit	
	plaque- filament en milliamp.	grille- filament en milliamp.		plaque- filament en milliamp.	grille- filament en milliamp.
-30 volts	0	0	$+2$ volts	2,80	0,02
-28	0	0	$+4$	3,35	0,06
-26	0	0	$+6$	3,65	0,18
-24	0	0	$+8$	3,85	0,30
-22	0	0	$+10$	4	0,35
-20	0	0	$+12$	4,10	0,37
-18	0	0	$+14$	4,12	0,40
-16	0	0	$+16$	4,13	0,42
-14	0	0	$+18$	4,13	0,44
-12	0	0	$+20$	4,13	0,46
-10	0	0	$+22$	4,12	0,48
-8	0,04	0	$+24$	4,11	0,50
-6	0,4	0	$+26$	4,10	0,52
-4	0,75	0	$+28$	4,08	0,54
-2	1,35	0	$+30$	4,06	0,56
-0	2	0			

On constate, à la simple inspection de ce tableau, qu'à toute variation de l'état électrique de la grille correspond une variation du courant de plaque ; mais celle-ci, ayant lieu par la mise en jeu d'une énergie beaucoup plus considérable, *amplifiera* fortement les variations de l'état électrique de la grille, tout en suivant fidèlement le rythme (Roussel, p. 63).

La grille joue ainsi le rôle d'un « clapet extrêmement souple qui est fermé lorsque la grille est négative, empêchant le passage des électrons et l'établissement du courant plaque-filament. Ce clapet s'ouvre lorsque la grille est positive, laissant passer librement les électrons et le courant plaque-filament. Toutes les positions intermédiaires peuvent être occupées par ce clapet et chaque position dépend seulement du potentiel de la grille » (Pierre Louis, p. 25).

En d'autres termes, la lampe à trois électrodes constitue un *relais* très sensible, très rapide et dépourvu d'inertie, grâce à la grande différence qui existe entre, d'une part, la distance très petite qui sépare le filament de la plaque, et qui est franchie par les électrons avec une vitesse énorme, et d'autre part, la période des oscillations hertziennes utilisées en télégraphie et en téléphonie sans fil (*idem*, p. 26).

On comprend, d'après ce qui précède, pourquoi on a donné le nom d'*amplificateurs* aux lampes à plusieurs électrodes.

La figure 115 donne l'aspect d'une lampe à 3 électrodes telle que l'ont employée, pendant la guerre, l'armée et la marine françaises. L'ampoule en verre est de forme sphérique, la grille est un fil enroulé en hélice concentriquement au filament, et la plaque, qui a la forme d'un cylindre fendu, enveloppe le tout.

On voit en bas, émergeant hors du culot de la lampe, les quatre prises de courant parallèles qui relient, conformément au schéma de la figure 114, les trois organes intérieurs *F*, *G* et *P* avec les fils extérieurs aboutissant aux trois sources de courant. Ces quatre prises peuvent être facilement embrochées sur des douilles isolées correspondantes. D'autres types de lampes à 3 électrodes ont été en usage dans les armées allemandes (Telefunken), anglaises (Marconi), américaines, etc.

La lampe à plusieurs électrodes considérée ci-dessus dans son rôle amplificateur, peut aussi être employée comme *détecteur*. On peut en effet facilement la disposer de telle manière qu'elle supprime l'une des alternances des ondes hertziennes, abaisse ainsi leur fréquence et rende ces ondes audibles dans le téléphone.

Enfin, sous le nom d'*hétérodyne*, une lampe à vide peut, dans un



Fig. 115

poste de réception, jouer le rôle d'émetteur d'ondes hertziennes entretenues et comme telle servir à renforcer localement l'une des ondes hertziennes à haute fréquence reçues par l'antenne réceptrice. Supposons, par exemple, que les ondes reçues se succèdent à raison de 100 000 par seconde, et qu'à chaque centaine d'ondes, l'une d'elles soit renforcée ; nous entendrons au téléphone $\frac{100\,000}{100} = 1000$ ren-

forcements par seconde, et cet instrument donnera un son musical parfaitement perceptible à l'oreille ; un trait du code Morse sera formé d'un certain nombre de ces 1000 vibrations, un point, d'un nombre plus faible.

L'hétérodyne locale permet précisément d'obtenir ces renforcements, lorsque les ondes reçues à l'antenne sont entretenues. Voici comment : supposons que notre poste de réception ait comme détecteur un cristal à galène du type de la figure 102 et que le poste soit accordé, au moyen des self et des condensateurs variables (fig. 105), avec la longueur d'onde des ondes entretenues reçues par l'antenne. Ces ondes agissent sur le circuit d'accord, se détectent au cristal, mais laissent le téléphone muet puisque leur fréquence est trop grande.

Plaçons maintenant la lampe hétérodyne montée comme l'indique la figure 116, où les bobines B_1 et B_2 dites, l'une bobine de grille, l'autre bobine de plaque, constituent un couplage serré, où la pile de plaque est à voltage relativement élevé (40 à 250 v.) et où enfin le condensateur C variable permettra de modifier dans de larges limites, la longueur des ondes entretenues produites par l'hétérodyne dans le circuit fermé où se trouvent la self B_2 et la capacité C .

Le poste local représenté par la figure 116, constitue un émetteur d'ondes entretenues dont on est maître de régler la fréquence d'une manière continue. Il induit dans le circuit du poste récepteur auprès duquel il est placé, des oscillations qui se superposent aux oscillations entretenues reçues par l'antenne. Si les fréquences de ces deux systèmes sont très voisines l'une de l'autre, il se produit un phénomène d'interférence, analogue à celui qu'en acoustique on nomme *battement*.

Si, par exemple, l'onde d'antenne fait 1000 vibrations et celle de l'hétérodyne 999, les maxima d'amplitude de ces deux espèces d'on-

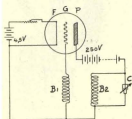


Fig. 116

des ne coïncident qu'à la millième vibration et ce sera cette onde renforcée que recevra le téléphone.

Ainsi, non seulement on aura abaissé dans le téléphone la trop haute fréquence de l'onde d'antenne, mais on sera arrivé à ce résultat par *augmentation d'énergie*, l'énergie locale de l'hétérodyne s'ajoutant à celle recueillie par l'antenne.

Notons ici en passant qu'on peut, à volonté, faire l'amplification par lampe soit avant détection sur courant à haute fréquence, soit après détection sur courant à basse fréquence.

De l'emploi de la lampe à vide en hétérodyne de réception, à celui de la même lampe comme générateur d'ondes entretenues dans un poste émetteur, il n'y a évidemment qu'un pas. La figure 117, empruntée à l'ouvrage de M. Pierre Louis¹, donne le schéma d'un poste générateur de cette espèce.

A est l'antenne avec sa self réglable S, C, le condensateur variable, M, le manipulateur. « Le condensateur C, qui est placé entre la grille et l'extrémité de la bobine de plaque reliée à l'antenne, sert non seulement à régler le circuit grille sur le circuit plaque (circuit antenne-terre), mais il sert aussi au couplage de ces deux circuits ; il réalise dans l'antenne la plus grande intensité possible de courant indiquée par l'ampèremètre thermique T » (*La T. S. F. par les tubes à vide*, p. 91).

Pour comprendre le rôle d'une lampe à trois électrodes qui fonctionne comme générateur d'ondes entretenues, il est bon de revenir sur la différence que nous avons déjà esquissée, à page 144, entre ondes amorties et ondes entretenues. Reprenons encore une fois l'analogie que nous avons établie entre les oscillations hertziennes et les oscillations d'un pendule.

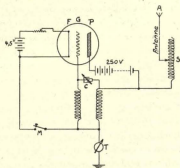


Fig. 117

¹ D'une manière générale, l'auteur en rédigeant le présent chapitre VII s'est inspiré largement des excellents ouvrages déjà cités de M. Joseph ROUSSEL et de M. Pierre LOUIS, intitulés, le premier : *Le Livre de l'Amateur de T. S. F.*, le second : *La T. S. F. par les tubes à vide* et édités tous deux par la librairie Vuibert, 63, boulevard St-Germain, Paris, ouvrages dont on recommande l'étude détaillée à ceux de nos lecteurs qui désireraient compléter les notions, forcément superficielles, présentées ici sur l'état actuel de la T. S. F.

Si l'on écarte de sa position de repos un pendule libre et qu'on l'abandonne ensuite à la seule action de la pesanteur, il effectue un certain nombre d'oscillations dont l'amplitude diminue peu à peu, puis il s'arrête. Si, après un temps très long relativement au temps que ces oscillations ont duré, on remet le pendule en marche puis qu'on le laisse de nouveau s'arrêter de lui-même, et si l'on répète un grand nombre de fois cette expérience élémentaire, l'ensemble de ces expériences sera l'image des trains d'ondes électriques amorties dont notre figure 95 a déjà donné une idée.

Mais si, dans l'expérience du pendule, on s'arrange de telle manière que les oscillations successives de ce pendule, une fois en marche, ne s'arrêtent plus et continuent à se produire indéfiniment en conservant toujours la même amplitude initiale (ce à quoi on arrive, en horlogerie, par exemple, au moyen d'un échappement qui restitue à la fin de chaque oscillation, la force vive perdue par frottements pendant l'oscillation précédente), on aura réalisé l'entretien du mouvement pendulaire.

Notre pendule est ici l'image de l'antenne, et la grille de la lampe joue le rôle de l'échappement, tandis que la source de courant du circuit-plaque est l'analogue du poids ou ressort-moteur de l'horloge. L'antenne (supposée déjà en oscillations) fait osciller le potentiel de la grille, et alors celle-ci jouant son rôle de clapet, ouvre et ferme périodiquement le circuit de la pile de plaque ; elle fournit ainsi des émissions de courant rythmées selon la fréquence des oscillations de l'antenne, émissions qui, à leur tour, entretiennent les oscillations de l'antenne elle-même.

En d'autres termes la pile de plaque dont le circuit est ouvert et fermé, aux moments voulus, par la grille, restitue à chaque oscillation de l'antenne l'énergie que celle-ci a perdue (par rayonnement et par effet de Joule) pendant l'oscillation précédente.

Lorsqu'une seule lampe à trois électrodes ne suffit pas à livrer l'énergie oscillante désirée, on utilise plusieurs lampes, et celles-ci, pour les postes émetteurs de faible puissance, peuvent être les mêmes que celles qui servent à la détection et à l'amplification dans les postes récepteurs. Ces lampes multiples sont alors montées en parallèle, les filaments, les grilles et les plaques des différents tubes étant respectivement reliés entre eux et entre elles ; en outre, la tension de plaque doit être plus élevée (150 à 350 volts).

Dans les postes émetteurs à grande puissance organisés avec lampes, le chauffage des filaments absorbe à lui seul quelques dizaines ou

même quelques centaines de watts, et la tension plaque doit être poussée jusqu'à 1000 et parfois 2000 volts. Les lampes de ces postes ont alors des dimensions bien plus considérables que celles des postes de réception, et affectent souvent la forme représentée par la figure 118 dans laquelle le filament, qui peut absorber plusieurs dizaines de volts et quelques ampères, est parfois recouvert d'oxydes de terres rares (strontium, baryum, etc.) qui ont pour effet d'augmenter le nombre d'électrons émis par unité de temps. La grille de ces lampes à grande puissance peut consister en un certain nombre de fils fins en nickel ou en molybdène tendus sur les deux faces d'un support rectangulaire en verre à l'intérieur duquel sont suspendus un ou plusieurs filaments. De part et d'autre de ce support, deux lames de nickel réunies électriquement entre elles, constituent la plaque de la lampe, dont la tension peut aller jusqu'à 1500 volts (Louis, p. 15 et 97).

Cadres. — Un perfectionnement très important des postes de réception de T. S. F., qui a été la conséquence de l'emploi des tubes à vide, a été la substitution à l'antenne de l'organe auquel on a donné le nom de *cadre*.

Le cadre n'est autre chose que la self de l'oscillateur fermé de notre figure 93. Il consiste en un certain nombre de spires de fil isolé *ab* (fig. 119) enroulées dans le plan d'un support rectangulaire ou circulaire. Or, ce plan est disposé de manière à pouvoir être *orienté* géographiquement vers le poste émetteur dont on désire capter les ondes électriques. Si par exemple on déplace le plan du cadre de telle façon que les ondes émises l'atteignent dans une direction parallèle à celle des spires, on recueille le maximum d'énergie (position *A*, fig. 120). Réciproquement dans la position *B*, perpendiculaire à *A*, l'audition sera faible et même pratiquement nulle (Roussel, p. 19).

Si l'on complète la self du cadre (rendue elle-même variable), par la capacité d'un condensateur variable *c* (fig. 119), on a, comme l'on sait, tout ce qu'il faut pour accorder le mieux possible la longueur

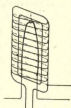


Fig. 118

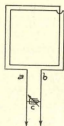


Fig. 119

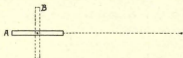


Fig. 120

d'onde du poste récepteur avec celle d'un poste d'émission quelconque dont on connaît et la situation géographique et la longueur d'onde.

Lorsqu'il s'agit de capter les ondes électriques d'un puissant poste émetteur tel que celui de la Tour Eiffel, dans un rayon ne dépassant pas 50 kilomètres, la disposition d'un poste récepteur avec détecteur *D* à galène, par exemple, devient très simple (fig. 121). L'emploi du cadre est tout indiqué dans un poste récepteur pourvu de lampes amplificatrices et alors on peut recevoir les signaux de n'importe quel poste émetteur proche ou lointain.

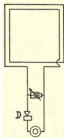


Fig. 121

Téléphonie sans fil. — La voix humaine peut être transmise d'une manière parfaite au moyen des lampes à trois électrodes produisant, d'une part au poste émetteur, des ondes entretenues dont un bon microphone ordinaire fait varier l'amplitude selon les modulations de la voix, d'autre part au poste récepteur, en détectant ces ondes, et alors la membrane du téléphone écouteur reproduira tous les sons émis près du microphone. La figure 122 donne le schéma d'un poste téléphonique transmetteur dans lequel le microphone est placé en dérivation sur quelques spires de la bobine *B₂* de plaque.

Dans les postes émetteurs puissants, on préfère faire agir le microphone sur le circuit grille dont il modifie la tension et qui réagit à son tour sur la tension de la plaque.

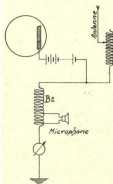


Fig. 122

Aux postes de réception, on emploie souvent à côté du double téléphone écouteur (à mettre en contact direct avec les pavillons des oreilles), un *téléphone haut-parleur* qui permet de faire entendre à distance les messages télégraphiques ou téléphoniques du poste émetteur, par de nombreuses personnes réunies dans une même salle.

Inscription des signaux Morse reçus par T. S. F. — Nous avons déjà vu à pages 155 et suivantes comment, dès le début de la T. S. F., on a pu, au moyen du type de détecteur appelé

cohéreur, recevoir par enregistrement sur la bande de papier d'un

récepteur Morse ordinaire, les trains d'ondes ou signaux expédiés sous la forme des traits et des points du code Morse, par le levier-clé, manœuvré à la main, du poste émetteur.

Aujourd'hui, cette manière de procéder à l'enregistrement des signaux télégraphiques Morse reçus par T. S. F., a été abandonnée comme pleine de difficultés et d'ennuis, et l'inscription est maintenant obtenue, avec beaucoup plus de succès, par d'autres procédés plus modernes, plus rapides, dont les lampes à vide constituent de nouveau l'une des parties essentielles.

Le problème de l'inscription ne peut d'ailleurs être laissé de côté. La réception *au son* des signaux Morse, telle que la réalise le téléphone-écouteur après détection, exige tout d'abord un apprentissage relativement long ; elle fatigue rapidement les télégraphistes ; enfin, elle ne laisse aucune trace des télégrammes reçus, ce qui, dans certains cas, peut présenter de graves inconvénients (dépêches chiffrées, preuves des télégrammes effectivement reçus inexistantes, etc.).

Mais il y a encore une autre raison, d'une portée générale, qui nous engage à esquisser tout au moins ici la méthode à employer pour transformer l'énergie extrêmement faible des ondes hertziennes qui est reçue par un poste récepteur quelconque, en une autre énergie amplifiée et capable de mettre en action n'importe quel dispositif électro-mécanique tel qu'un enregistreur Morse, un chronographe électrique, un canot-moteur, un véhicule terrestre, un avion, etc. En fait, le problème ci-dessus énoncé n'est autre que celui des *déclancheurs*, que nous aurons l'occasion de reprendre dans le chapitre III, lettre B de la partie pratique du présent ouvrage. Il s'agit en effet de mettre en série entre l'énergie très affaiblie reçue par l'antenne réceptrice et celle beaucoup plus considérable nécessitée par le dispositif électro-mécanique (ici l'inscripteur Morse), un certain nombre d'appareils *déclancheurs*, autrement dit de *relais* dont le premier commande la série des autres sans modifier sensiblement les instants et les durées de fonctionnement de leurs organes mobiles.

On comprend d'ailleurs immédiatement que le premier relais de la série peut être constitué par une lampe à vide fonctionnant soit en détectrice, soit en amplificatrice, les autres relais (primaire, secondaire, etc.) étant de nature électro-mécanique.

La figure 123 donne une idée des liaisons à établir entre les relais, disposés en cascade, et les diverses sources de courant que chacun d'eux insère à son tour dans le système.

En matière d'inscription des signaux Morse, un relais primaire

sensible, utilisant les faibles courants (de l'ordre du milli-ampère) qui parcourent le téléphone, dans un poste recevant au son, et un relais secondaire simple, rapide et robuste supportant à sa sortie des courants de l'ordre de l'ampère, suffisent à atteindre le but désiré.

Le relais secondaire peut être de l'un ou de l'autre des types bien connus employés en télégraphie ordinaire par fils.

Les relais primaires, par contre, offrent quelques difficultés d'éta-

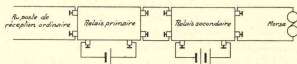


Fig. 123

blissement, à cause précisément de la faiblesse des courants qui doivent mettre en action leurs équipages mobiles.

M. J. Roussel les divise en :

1^o Relais *magnétiques*, qui comprennent les relais polarisés à électro-aimant et palette, et les relais à cadre mobile.

2^o Relais *microphoniques*, qui sont basés sur l'emploi d'un contact en graphite, analogue à celui ou à ceux qui constituent l'organe essentiel d'un microphone.

3^o Relais *acoustiques*, qui, sous l'une de leurs formes les plus simples, utilisent directement les vibrations de la membrane du téléphone récepteur (après détection par lampe), et les font réagir sur un contact microphonique agissant lui-même, non pas par rupture totale du courant, mais bien par variation de la résistance du circuit.

Nous ne pouvons entrer ici dans le détail de ces divers types de relais primaires et nous nous contentons de renvoyer le lecteur au chapitre XII du livre déjà maintes fois cité de M. J. Roussel. La même remarque doit être faite au sujet de l'inscripteur Morse proprement dit, dont il existe également divers types, notamment celui dit à *bande* qui ressemble au récepteur Morse ordinaire, et celui à cylindre tournant qui se rapproche plutôt du chronographe enregistreur à cylindre (que nous décrirons au chapitre IX de notre partie pratique).

PARTIE PRATIQUE

Introduction.

Les instruments consistant en mouvements d'horlogerie sur lesquels réagissent des organes électro-mécaniques sont en nombre infini. Les horloges électriques proprement dites n'en forment qu'une catégorie relativement restreinte, à côté de laquelle les télégraphes, les enregistreurs de toutes espèces, les appareils de sûreté et de contrôle pour l'exploitation des chemins de fer et une foule d'autres appareils de formes et de buts très divers, constituent une classe aussi nombreuse qu'intéressante.

L'espace dont nous disposons ici ne nous permet pas d'entrer dans le détail de tous ces mécanismes et nous limiterons notre champ d'action à l'étude de ceux d'entre eux dans lesquels la *mesure du temps* joue un rôle principal.

Parmi les dispositifs qui ont été proposés pour obtenir tel ou tel résultat déterminé, nous décrirons ceux-là seulement qui offrent un intérêt réel, soit par leur originalité, soit par le succès qu'ils ont obtenu auprès du public, soit encore par certains caractères typiques résumant les traits distinctifs de toute une classe.

Cette réserve, nécessaire à la concision et à la clarté de cette étude, nous autorisera à laisser complètement de côté un grand nombre d'appareils dépourvus des qualités que nous venons de mentionner et dont la description n'aurait d'autre résultat que de surcharger inutilement certains chapitres.

Nous ne nous occuperons de l'historique des questions rentrant dans notre cadre que dans la mesure où cela paraîtra utile. Par contre, nous nous attacherons à exposer au lecteur les faits généraux que les expériences faites jusqu'ici ont mis en lumière, et qui, comme tels, doivent se trouver à la base de tout système électrochronométrique bien combiné.

Classification générale.

Le rôle de l'électricité dans les horloges est de deux sortes :

Ou bien cet agent fournit la force motrice entretenant le mouvement des mobiles (rouages, aiguilles, ou simplement balancier, pendule, etc.) d'une horloge considérée isolément,

ou bien il sert de lien entre plusieurs horloges et établit entre elles une solidarité telle que leurs marches soient rendues synchrones avec celle de l'une d'entre elles prise comme horloge directrice.

Dans le premier cas, les remontages journaliers, hebdomadaires, mensuels, etc., du poids ou du ressort, effectués à la main, sont remplacés par l'entretien de la pile (ou de toute autre source de courant) fournissant le courant moteur, mais l'opération consistant à corriger les écarts accumulés ensuite de l'imperfection inévitable de l'organe régulateur ou des mobiles sur lesquels il réagit, n'est point supprimée et l'horloge électrique de ce type doit être maintenue à l'heure aussi bien qu'une horloge purement mécanique. Les horloges rentrant dans cette première catégorie ont été appelées par les auteurs français, par Du Moncel entre autres, *horloges électriques* ; mais pour éviter la confusion à laquelle donnerait lieu cette désignation évidemment trop générale, nous leur donnerons le nom d'*horloges électriques indépendantes*.

Dans le second cas, au contraire, c'est l'intervention de l'homme en vue du maintien à l'heure, qui est supprimée, au moins pour la presque totalité des cadrans solidaires ; seules les horloges *directrices*, ou *horloges-mères* doivent être remises ou maintenues à l'heure. Les installations horaires rentrant dans cette seconde catégorie sont appelées : *Systèmes d'unification de l'heure par l'électricité*.

La classe des *horloges électriques indépendantes* se subdivise en deux sous-classes qui se distinguent entre elles par la manière dont la force motrice électrique entretient le mouvement des mobiles. Ce sont :

A. la sous-classe des *horloges à remontoir électrique* dans lesquelles le mécanisme est analogue à celui des horloges mécaniques ordinaires et possède les mêmes organes essentiels, savoir : le ressort ou poids moteur, le train d'engrenages, la minuterie, l'échappement, et enfin le régulateur à pendule ou à balancier ; et alors le ressort ou le poids moteur au lieu d'être remonté manuellement, l'est électromagnétiquement ;

B. la sous-classe des horloges électriques indépendantes, dans lesquelles c'est l'organe régulateur lui-même (pendule ou balancier) dont les oscillations sont entretenues indépendamment du rouage. Celui-ci (qui en tant que partie intégrante de l'horloge proprement dite est d'ailleurs souvent supprimé), ne consiste plus qu'en une minuterie dont les aiguilles et le cadran n'ont d'autre fonction que de *compter* les oscillations du régulateur. Le lien entre ce dernier et la minuterie peut être mécanique ou électrique : dans le premier cas, le pendule, siège de la force motrice, fait tourner, au moyen d'un dispositif à cliquets, une roue à rochet, premier mobile de la minuterie *mécanique* ; dans le second cas, il ferme un contact qui lance le courant dans l'électro-aimant de la minuterie *électrique* ; on comprend facilement que celle-ci peut se trouver à une distance quelconque de l'organe régulateur qui la commande et qu'alors son influence mécanique (frottements, huiles, chocs, etc.) sur cet organe est nulle.

La sous-classe B ci-dessus se subdivise elle-même en :

B₁. horloges électriques indépendantes à *réactions directes* dans lesquelles l'organe régulateur est *directement* soumis aux impulsions électro-magnétiques ;

et B₂. horloges électriques indépendantes à *réactions indirectes* dans lesquelles il y a un intermédiaire (poids ou ressort) entre l'organe régulateur et l'organe électromagnétique.

Les divers *systèmes d'unification de l'heure par l'électricité* peuvent être divisés en trois grandes classes, qui se distinguent entre elles selon la manière dont les horloges secondaires sont commandées électriquement par l'horloge directrice et qui se définissent comme suit :

A. systèmes où le courant distribué par l'horloge directrice est employé comme *moteur* actionnant directement les minuterie et par conséquent les aiguilles des horloges secondaires. Celles-ci reçoivent alors le nom de *compteurs électrochronométriques* (Du Moncel) ou aussi de *minuterie électromagnétiques*.

B. systèmes où ce courant est une simple *force de détente* destinée à remplacer l'action régulatrice du pendule chez les horloges secondaires ; sa fonction se réduit alors à opérer à intervalles réguliers le *déclanchement* du poids ou du ressort moteur (*horloges secondaires à déclanchement électrique*) ;

C. systèmes où le courant de l'horloge-mère agit comme *force correctrice* de la marche des horloges secondaires, celles-ci conservant non seulement leur moteur ordinaire (mécanique ou électrique), mais aussi leur régulateur (pendule ou balancier), et pouvant au besoin marcher tout à fait indépendamment de l'horloge directrice, lorsque celle-ci cesse, par accident, de lancer ses émissions correctrices. Cette troisième classe comprend :

C₁. les systèmes dits de *remise à l'heure* où les cadrans secondaires sont des horloges ordinaires, le plus souvent mécaniques, qui sont pourvues de leur moteur et de leur régulateur (avec échappement à ancre ou à cheville), et dans lesquelles le courant, envoyé à de grands intervalles (toutes les heures, toutes les six heures ou même toutes les douze heures), a pour fonction d'opérer instantanément la correction des aiguilles (ou de l'une des roues les commandant), en les amenant à la même position que celles de l'horloge directrice ;

C₂. les systèmes dits à *synchronisation* où les horloges secondaires sont également pourvues d'un moteur et d'un régulateur ; ici le courant correcteur, envoyé par l'horloge-mère, agit directement sur le pendule en accélérant ou retardant ses oscillations. Les émissions de courant sont alors rapprochées les unes des autres ; elles ont ordinairement lieu toutes les secondes, ou toutes les deux secondes, ou même toutes les minutes et elles ont pour effet de *synchroniser* les oscillations des pendules secondaires en les faisant battre à l'unisson avec le pendule de l'horloge directrice.

Ces différents systèmes ont tous été appliqués d'une manière rationnelle, soit qu'on ait employé chacun d'eux à l'exclusion des autres, soit qu'au contraire on les ait combinés les uns avec les autres.

Nous allons passer successivement en revue les diverses catégories d'appareils mentionnés au présent chapitre I dans l'ordre même adopté ci-dessus.

Horloges électriques indépendantes.

Généralités. — On comprend facilement les avantages que l'on peut tirer de la coopération de l'électricité, lorsqu'il s'agit de faire marcher synchroniquement un certain nombre de cadrans plus ou moins éloignés les uns des autres : l'instantanéité de son action, la propriété qu'elle a d'agir à de grandes distances, expliquent suffisamment son emploi comme agent d'unification de l'heure.

L'utilité du rôle de l'électricité dans les horloges indépendantes est moins aisée à démontrer, et, au premier abord, on se demande ce que l'on gagne à substituer à l'opération si simple du remontage, fait à la main, d'un poids ou d'un ressort, le jeu d'une source de courant qui, quelle qu'elle soit (pile, accumulateurs, réseau urbain de force ou de lumière, etc.), peut présenter des risques d'interruption totale ou d'intensité insuffisante, nécessite en outre une surveillance et occasionne ainsi des frais d'entretien.

Cependant, en considérant les choses d'un peu plus près, on constate que les horloges électriques indépendantes ont, sur les horloges purement mécaniques, certains avantages que l'on peut énumérer comme suit :

1^o Lorsqu'il s'agit d'atteindre un degré de précision de marche tel que celui, toujours plus élevé, que l'on exige actuellement dans les établissements scientifiques et notamment dans les observatoires astronomiques, les pendules électriques sont incontestablement supérieures aux pendules à poids, soit que, grâce à des simplifications que nous apprendrons à connaître plus loin, elles permettent de supprimer tout ce qui est engrenages, pivots, huiles et autres organes analogues à frottements plus ou moins variables, soit qu'elles puissent être plus facilement soustraites à l'influence perturbatrice des variations barométriques et thermométriques, soit enfin que, pour celles dans lesquelles on conserve rouages, échappement et lubrifiants, l'emploi bien compris de l'électricité permette de réduire à un minimum l'in-

fluence des variations de la force motrice actionnant ces organes.

2^o Une pendule électrique de haute précision peut, moyennant certaines précautions dont on trouvera plus loin l'énoncé, et sans qu'il en résulte pour elle aucun risque de marche moins régulière, être pourvue ou accompagnée des organes ou dispositifs assurant la distribution aussi étendue que l'on voudra, de l'heure exacte, à n'importe quels appareils électromagnétiques horaires (compteurs électrochronométriques battant la seconde ou la minute, pendules secondaires synchronisées, chronographes-enregistreurs permettant d'évaluer, à une petite fraction de seconde près, la durée ou l'instant précis d'un phénomène quelconque, enregistreurs météorologiques, etc.), répartis dans les divers locaux d'un ou de plusieurs établissements scientifiques ou industriels (pendule fondamentale d'un observatoire, d'un laboratoire, ou d'une fabrique de chronomètres et de montres de précision).¹

3^o Là où la précision de la marche ne joue qu'un rôle accessoire, certains systèmes d'horloges électriques indépendantes, notamment celui de Hipp à palette et à contre-palette, peuvent fournir un travail mécanique considérable à côté de celui, d'ailleurs minime, qui est absorbé par la mise en action des aiguilles et de leurs minuteriers. Cette qualité précieuse a permis d'actionner mécaniquement les appareils les plus divers (appareils enregistreurs de toutes espèces, contrôleurs des variations de vitesse des trains, contrôleurs de rondes, enregistreurs limnimétriques, barométrographes et toute la série des enregistreurs météorologiques, thermométrographes, anémographes, hygrographes, sismographes, etc.), et cela sans que la marche régulière de ces pendules soit influencée à un degré trop grand par les résistances des organes souvent compliqués de ces appareils. Elle a permis également de multiplier, dans une mesure considérable, le nombre des contacts électriques plus ou moins fréquents que doivent fermer les pendules et de commander ainsi, d'un point central, les instruments électro-magnétiques les plus divers (compteurs électrochronométriques battant la seconde, la minute, ou toute autre fraction de temps utile, signaux horaires automatiques [acoustiques, optiques, enregistreurs], réveille-matin électriques, sonneries d'heures, calendriers, enregistreurs de toutes espèces, etc.), en un mot,

¹ *Nota.* Il a été reconnu que des pendules de précision à poids sont plus ou moins influencées, dans leur marche, par les résistances mécaniques provenant des contacts électriques à mettre en jeu pour actionner directement, fût-ce à un ou deux exemplaires seulement, les appareils horaires dont nous venons de parler.

des appareils quelconques dont les électro-aimants doivent être mis en action à des intervalles réguliers.

Dans toutes les horloges électriques indépendantes dont nous venons d'énumérer les caractéristiques essentielles et les avantages, c'est l'horloge elle-même qui, aux moments voulus, ferme automatiquement le circuit du courant sur l'organe électromagnétique chargé d'entretenir le mouvement des mobiles. Cette fermeture s'effectue au moyen d'un *contact-interrupteur* dont la disposition et l'exécution, surtout lorsqu'il s'agit de pendules de haute précision, doivent être parfaites à tous les points de vue : précision absolue du début, de la fin et par conséquent de la durée de ce contact ; inaltérabilité aussi grande que possible de ses surfaces, autrement dit, application des meilleurs moyens à employer pour éviter la saleté, la poussière, les étincelles oxydantes des extra-courants, etc., et enfin existence à chacune des fermetures du contact, d'une *pression* suffisante pour assurer, d'une manière constante et régulière, la circulation des émissions de courant successives.

Nota. Des indications plus détaillées seront données, au chapitre III, sur les précautions à prendre pour réaliser de bons contacts-interrupteurs. Ces indications seront en effet mieux en place dans la partie de cet ouvrage qui traite des systèmes d'unification de l'heure, parce que ce sont les contacts des horloges directrices de ces systèmes qui présentent les plus grandes difficultés, en raison des intensités ou des forces électromotrices relativement considérables auxquelles ils doivent livrer passage.

A. Horloges électriques indépendantes à remontoir.

Généralités et sous-classification. — Nous avons déjà indiqué leur principe : un ressort ou un poids réagissant soit directement, soit par l'intermédiaire de plusieurs mobiles, sur la roue d'échappement, est remonté à intervalles réguliers par l'organe électromagnétique.

C'est *Louis Breguet* (1804-1883), de Paris, qui a eu le premier l'idée de cette disposition. Dans la pendule qu'il exécuta en 1856, la roue d'échappement était calée sur un axe qui portait, vis-à-vis d'elle, mais montée à frottement doux, une roue à dents de rochet. Un ressort spiral, placé entre les deux roues, avait son extrémité intérieure fixée

sur l'axe et son extrémité extérieure attachée à l'un des bras de la roue à rochet. Ce spiral, constituant le remontoir, était tendu par l'armature plate de l'électro-aimant remonteur, chaque fois que celui-ci, après avoir reçu le courant de la pile et attiré cette armature, laissait celle-ci revenir à sa position non-attirée, sous l'influence de son ressort antagoniste. A cet effet, le levier d'armature, prolongé en haut, portait un cliquet d'impulsion qui faisait avancer d'une dent la roue à rochet à chacun de ces mouvements de retour et tendait ainsi le ressort spiral d'une quantité égale à celle dont il s'était détendu pour faire tourner la roue d'échappement. Or comme c'était le pendule lui-même qui, dans sa position inclinée à droite, fermait le circuit de l'électro-aimant remonteur, celui-ci agissait chaque fois que ce pendule avait accompli une oscillation. La roue d'échappement était ainsi toujours soumise à l'action du ressort-remontoir et tournait continuellement dans le même sens, comme si elle avait été actionnée par la force, convenablement réduite, d'un ressort de barillet ordinaire. Breguet utilisait le premier mouvement (celui d'attraction) de l'armature, pour faire avancer chaque fois d'une dent une seconde roue à rochet qui constituait le premier mobile de la minuterie et commandait ainsi les aiguilles de l'horloge.

Plus tard, Breguet compléta celle-ci par l'addition d'un mouvement de sonnerie de pendule ordinaire, dont l'axe du barillet à ressort était lui-même remonté de la quantité voulue au moyen d'un train d'engrenages commandé par la rotation de la roue à rochet de la minuterie. Le nombre des dents des roues et pignons de ce train était calculé de telle manière que pendant les douze heures de marche représentant le cycle de la sonnerie, le barillet fût remonté, au total, de la quantité dont il s'était détendu dans le même intervalle de temps, pour frapper les coups correspondants.

De nombreux inventeurs de toutes nationalités, suivant plus ou moins servilement la voie ouverte par Breguet, ont réalisé des horloges électriques indépendantes basées sur le principe du remontoir. Citons parmi eux :

Mouilleron et Anthoiné qui munirent leur horloge d'un dispositif assurant la continuation de sa marche, même dans le cas où l'armature de l'électro-aimant remonteur manquerait, ensuite d'un défaut momentané du contact ou de la pile, un ou plusieurs de ses mouvements. Pour cela, le rochet de remontage du spiral tendait ce dernier d'une quantité légèrement plus grande que celle dont il se détendait par la rotation normale de la roue d'échappement, ce qui s'obtenait

simplement en donnant au rochet remonteur un nombre de dents inférieur à celui de cette roue. Mais alors, pour éviter la perturbation qui se serait produite dans le cas où tous les contacts auraient été bons, un mécanisme spécial empêchait le cliquet d'impulsion de faire avancer le rochet lorsque la tension maximum du ressort était atteinte.

Callaud, inventeur de la pile de ce nom, qui adapta le ressort du remontoir non pas sur l'axe même de la roue d'échappement, mais sur un mobile à rotation plus lente, ce qui permit de ne fermer le contact qu'une fois seulement par minute et cela au moyen d'un dispositif spécial dont on trouvera la description dans l'ouvrage de Du Moncel (*Applications de l'électricité*, tome IV).

On pourra lire, dans le même ouvrage, la description détaillée de la pendule électrique sonnante de *Mildé*, qui est intéressante à plus d'un titre.

Enfin, citons encore ici, comme rentrant dans la catégorie des horloges à remontoir ayant eu quelque succès il y a trente ou quarante ans, celles de Lewin & C^{ie}, à Berlin ; Förster, à Posen ; Zimmer, à Furtwangen ; Schweizer, à Soleure ; Napoli, en France, etc.

Depuis quelques années, et notamment depuis que les compteurs et enregistreurs d'énergie électrique ont pris une si grande importance dans la tarification rationnelle des abonnés à l'éclairage et à la force, le rôle des horloges indépendantes à remontoir électrique a lui-même pris une importance croissante et divers inventeurs se sont efforcés de trouver des dispositifs plus simples, plus sûrs et plus pratiques que ceux employés jusqu'alors pour assurer la marche continue et automatique d'une horloge électrique branchée sur le réseau urbain (compteurs à tarif multiple, heures-mètres, etc.). Nous reviendrons plus loin sur ce point spécial.

D'autre part, des constructeurs de pendules de haute précision, parmi lesquels le D^r Riefler, de Munich, est le plus connu, ont posé en principe que c'est le remontoir électrique qui, combiné avec un système d'échappement à ancre perfectionné (Riefler, Strasser, etc.), est le plus capable de résoudre dans toute son étendue le difficile problème de la conservation et de la distribution de l'heure astronomiquement exacte dans les observatoires et autres établissements scientifiques. Nous verrons plus loin que ce même problème, grâce aux progrès réalisés tout récemment dans les applications de l'électricité à la chronométrie, peut être résolu aujourd'hui avec plus de

succès, au moyen des pendules électriques à réactions indirectes, qui ont sur les pendules à remontoir du type Riefler l'avantage de permettre la suppression complète des engrenages, des pivots et des lubrifiants dans les pendules fondamentales. Cela soit dit ici sans méconnaître d'aucune façon la grande part de mérites attribuable à feu le Dr Riefler dans les progrès qu'a faits, durant les années d'avant-guerre, la pendulerie de haute précision.

Enfin le principe du remontoir électrique des horloges indépendantes a trouvé de nouvelles et nombreuses applications, non plus seulement sous la forme primitive que lui avaient donnée Breguet et ses imitateurs et qui consiste, comme nous l'avons vu, à utiliser, pour le remontage, les mouvements de va-et-vient d'une armature d'électro-aimant, mais bien sous la forme d'un induit de moteur électrique rotatif à marche intermittente ou continue, agissant sur des mobiles appropriés du mouvement d'horlogerie à maintenir en marche. On comprend facilement qu'étant donnée la grande variété de moteurs électriques de toutes puissances et de toute nature (continus, alternatifs, simples ou à phases multiples, etc.), que l'industrie des courants, faibles ou forts, est actuellement en état de livrer en séries, on puisse les appliquer à n'importe quelles grandeurs d'horloges, depuis le simple *œil de bœuf* de 25 ou 30 centimètres de diamètre de cadran, jusqu'aux horloges de clocher ou de fronton les plus grandes et les plus compliquées (par exemple avec sonneries d'heures et de quarts, répétitions d'heures, carillons, etc.).

Les remarques qui précèdent nous autorisent à classer comme suit les horloges modernes à remontoir électrique :

a) celles dans lesquelles le remontage est opéré par une armature d'électro-aimant agissant en va-et-vient ;

b) celles dans lesquelles ce remontage est opéré au moyen d'un moteur électrique rotatif.

Chacune des deux classes a) et b) ci-dessus peut elle-même se subdiviser en deux sous-classes et alors on obtient le tableau suivant :

a₁) horloges électriques à remontoir par électro-aimant chez lesquelles l'organe remonté est un poids ;

a₂) horloges électriques à remontoir par électro-aimant chez lesquelles l'organe remonté est un ressort ;

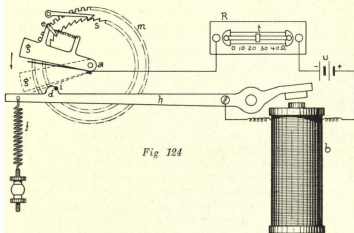
b₁) horloges électriques à remontoir par moteur rotatif, chez lesquelles ce dernier a une marche intermittente ;

b₂) horloges électriques à remontoir par moteur rotatif, chez lesquelles ce dernier a une marche continue.

a₁) Horloges électriques à remontoir par électro-aimant chez lesquelles l'organe remonté est un poids.

Pendule de Riefler. — La figure schématique N° 124 fait comprendre la disposition et le fonctionnement du remontoir électrique de Riefler.

m est une roue dentée qui actionne directement le pignon de la roue d'échappement. Celle-ci, qui n'est pas représentée sur la figure, a 30 dents ; elle fait un tour par minute en réagissant de la manière



connue sur les becs d'une ancre d'échappement du type Graham et maintient ainsi en oscillations un balancier pendulaire battant la seconde. Le système d'échappement, imaginé et réalisé par Riefler, pour assurer à la marche de ses pendules de haute précision le maximum d'exactitude possible, présente cependant les particularités suivantes :

L'axe d'oscillation de l'ancre est situé dans le prolongement de l'axe d'oscillation du balancier ; il est constitué par deux couteaux en acier qui reposent sur deux surfaces en pierres fines. Le balancier dont la tige est en acier *invar* (acier Guillaume) avec écrou-compensateur placé dans la lentille, est supporté par la partie inférieure d'une suspension à ressort, dont la partie supérieure est elle-même portée par le levier de l'ancre disposée là en forme de cadre. La roue d'échap-

pement est double, autrement dit consiste en deux roues dentées disposées sur un axe commun empierré ; l'une de ces roues opère les *arrêts* de cet axe commun et l'autre les *levées* entretenant les oscillations du balancier. Toutefois les levées réagissent sur ce balancier non pas directement par la fourchette d'ancre, mais bien indirectement, par l'intermédiaire de la suspension dont les ressorts légèrement fléchis par le jeu des levées d'ancre, transmettent aux moments les plus favorables l'impulsion au balancier.¹

Voici les avantages que, selon le D^r Riefler, cette disposition spéciale d'échappement assure à sa pendule de précision :

1^o Le balancier oscille librement sans être en aucune façon sous la dépendance des rouages.

2^o L'impulsion transmise au balancier a lieu tout près de son axe d'oscillation, à une distance d'une fraction de millimètre seulement (longueur de fléchissement des ressorts de suspension).

3^o Cette impulsion a lieu au moment le plus favorable de la course du balancier, soit celui où il passe par la verticale et possède ainsi la plus grande force vive.

4^o Elle se produit rapidement et doucement : rapidement parce que la levée de l'ancre est elle-même de courte durée ; doucement parce que c'est un intermédiaire élastique (les ressorts de la suspension), et non pas un organe rigide, qui la transmet.

5^o Le nombre des organes actifs de l'échappement est plus petit que dans n'importe quelle autre espèce d'échappement, ce qui lui assure une grande sûreté de fonctionnement.

6^o Enfin l'arc d'oscillation supplémentaire est environ cinq fois plus grand que l'arc de levée (avec l'échappement ordinaire de Graham, on a le rapport inverse). Il en résulte que les pendules de Riefler munies de son échappement ne s'arrêteront pas aussi facilement que d'autres sous l'influence de secousses et de trépidations.

Revenons à la figure 124.

Le mouvement de rotation continue de la roue dentée *m* est entre-tenu par la chute lente d'un levier *g* pesant à peu près dix grammes, qui a le même axe de rotation que *m* et sur lequel est articulé un cliquet d'impulsion *e*. Ce dernier engrène dans les dents d'une roue à rochet *s* qui, à son tour, est reliée avec la roue *m* par l'intermédiaire d'un contre-encliquetage à ressort (non dessiné sur la figure). Au

¹ On trouvera au tome II, pages 79 et suivantes du récent et captivant ouvrage de BOUASSE, intitulé : *Pendule, Spiral, Diapason*, l'analyse, avec figures schématiques, du jeu des échappements, type Riefler ou Strasser.

moment où le levier g atteint sa position inférieure g' (dessinée en pointillé), il s'appuie, par l'intermédiaire d'un ressort plat, à contact platiné, sur une saillie correspondante d du levier d'armature h de l'électro-aimant b et ferme ainsi le circuit de la pile u et des bobines de b . L'armature est brusquement attirée, son levier h est lancé en haut et entraîne dans cette ascension le levier g qui reprend alors sa position initiale supérieure ; le cliquet e , qui glisse sur les inclinés des dents du rochet s , ne peut faire obstacle à cette ascension.

Comme les leviers g et h n'ont pas le même axe de rotation, le contact électrique entre la saillie d et le levier g reste fermé pendant presque toute la durée de l'ascension ; ce n'est qu'au dernier moment de celle-ci que la pièce isolante i du levier h , en entrant à son tour en contact avec g , coupe le circuit du courant, ce qui a pour effet de faire retomber le levier h , sous l'influence du ressort antagoniste f . Mais le levier g ne suit pas h dans cette chute, parce que le cliquet e est retenu par une des dents du rochet s , située à quelques dents en arrière de celle que e avait accompagnée dans sa chute lente de tout à l'heure. L'ascension du levier g , qui est d'ailleurs de très courte durée, n'a pas pour effet de priver la roue dentée m , ni, par suite, la roue d'échappement de la pendule, de sa force motrice, parce que, pendant le remontage de g , c'est le ressort du contre-encliquetage ms qui agit à la place de g ; ce ressort se retend immédiatement dès le début de la chute lente de g et est ainsi de nouveau prêt à se substituer à ce dernier, lors du remontage suivant.

On comprend facilement que les variations de l'intensité du courant remonteur fourni par la pile u ne puissent avoir aucune influence sur la régularité de marche de la pendule Riefler. Ces variations ont en effet pour seule et unique conséquence de lancer plus ou moins haut le levier g , autrement dit de faire décrire à ce dernier un angle plus ou moins grand autour de l'axe a , et alors c'est tout simplement le nombre des secondes de durée de la chute de g qui est plus ou moins grand. Ce nombre peut en effet varier de 20 à 30 pour cent sans qu'il en résulte une mauvaise marche durable de la pendule. Il n'en est pas moins vrai qu'il est préférable d'assurer à ce courant la plus grande constance possible ; on y arrive en réglant le rhéostat R , au moyen du curseur t , de telle façon que la durée de la chute du levier g soit, en moyenne, de 36 à 38 secondes. La pile u consiste généralement en trois éléments secs intercalés en tension. A mesure que la pile diminue de force, on doit régler (une fois par mois environ) la position du curseur t

de manière à rétablir

Le D^r Riefler atteste
remontoir électrique,
surtout après qu'il

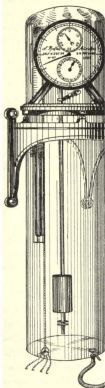


Fig. 125

qui a été installée dans
des tremblements de
au 9 novembre 1906,
huit millièmes de sec

¹ Voir le tome V, page 178,
moderne de Claudius Sa

La pendule de précision de Riefler est d'une construction compliquée et coûteuse. Le nombre des organes actifs, échappement, roues et pignons dentés, rochet, cliquets d'impulsion et de retient, levier de force constante, pivots, lubrifiants, etc., pouvant, lorsqu'ils se dérèglent, s'encrassent ou se grippent, perturber son fonctionnement correct, est inutilement grand. Nous disons « inutilement », parce que la preuve est faite que l'on peut arriver à des résultats de marche au moins égaux et même supérieurs, au moyen d'instruments horaires beaucoup plus simples, beaucoup moins coûteux, beaucoup plus robustes qu'une pendule de Riefler, instruments qui possèdent en outre sur celle-ci l'avantage précieux de donner, sans relais sur le chronographe enregistreur, des signaux plus réguliers et plus précis. C'est ce que nous verrons plus loin.

Horloge à remontoir de la Société «Normal-Zeit» de Berlin.—

Les figures 126 et 127 donnent l'une la vue de derrière, l'autre celle de devant d'une horloge du type N. Z.

K (fig. 126) est le noyau en fer d'un électro-aimant fixe à bobine

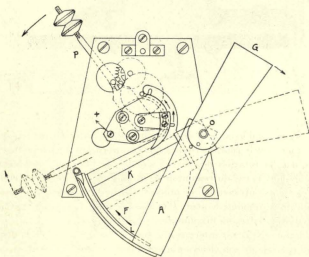


Fig. 126

unique (non-représentée sur la fig.). Ce noyau porte à son extrémité inférieure un épanouissement *L* en forme d'arc qu'enveloppe, sans le toucher, une armature de même forme ; celle-ci est solidaire du double

bras en fer *A*. Ce bras, pivoté en *O*, embrasse sans la toucher la bobine de l'électro-aimant *K*. *G* est un contre-poids d'équilibre.

Lorsqu'une émission de courant parcourt la bobine de *K*, l'armature *AL* est attirée et décrit autour de *O* un arc de cercle de près de 90° , en entraînant dans la direction de la flèche *F* le levier *P* dont

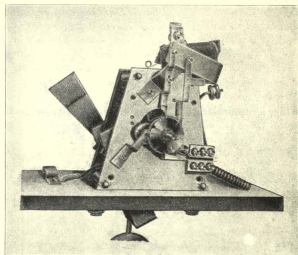


Fig. 127

l'axe se confond avec celui de la minuterie. Ce levier *P*, une fois qu'il est remonté et le courant coupé, agit sur un rochet à encliquetage et entretient la rotation des divers mobiles de l'horloge, absolument comme dans le cas du remontoir de Riefler. A la fin de cette chute, qui est lente, un contact se produit qui ferme une seconde fois le circuit de *K*, remonte le poids *P* et ainsi de suite. Les remontages ont lieu environ toutes les dix minutes.

L'horloge N. Z. est intéressante, tout d'abord à cause de la disposition spéciale de son électro-aimant quasi cuirassé, agissant sur une armature à longue course, et ensuite parce qu'elle a pu être munie par ses inventeurs d'un second électro-aimant, dit de *remise à l'heure*, qui est visible au haut de la figure 127, et qui, mis en action toutes les quatre heures, amène les aiguilles de l'horloge à remontoir N. Z. exactement dans la même position que celles d'une pendule dite

directrice ; celle-ci peut ainsi remettre à l'heure un grand nombre d'horloges identiques à celle qui vient d'être décrite. Nous constatons ici, pour la première fois au cours de cet ouvrage, la possibilité d'utiliser une horloge électrique indépendante comme horloge secondaire dans un réseau de distribution électrique de l'heure unifiée.

Horloge à remontoir avec sonnerie des heures. — La maison Favarger & C^{ie}, à Neuchâtel (Suisse) (autrefois Peyer, Favarger & C^{ie}), a construit et fait breveter un mécanisme d'horloge à remontoir électrique dont les figures 128, 129 et 130 donnent la disposition et qui présente les particularités suivantes :

1^o L'organe remonté peut être indifféremment un poids (fig. 129 et 130) ou un ressort (fig. 128).

2^o L'intervalle entre deux remontages successifs est toujours le même (le plus souvent, 60 secondes exactement).

3^o Le poids (ou le ressort) réagit directement sur le levier d'armature de l'électro-aimant remonteur. Cette armature accompagne le poids une fois levé (ou le ressort une fois tendu) dans son mouvement lent de retour.

4^o L'organe remonté peut non seulement entretenir le mouvement

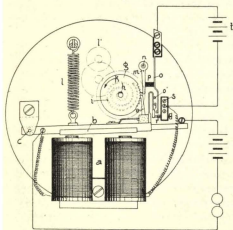


Fig. 128

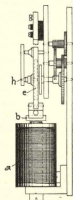


Fig. 128 bis

des mobiles proprement dits de l'horloge (roue d'échappement, balancier, minuterie, aiguilles), mais encore bander le ressort de barillet d'un mécanisme de sonnerie des heures ou de tout autre mécanisme

utile (par exemple, d'un contact-inverseur qui, fermé toutes les minutes, actionne des horloges secondaires à minute à électro-aimants polarisés).

Voici d'ailleurs le texte du brevet relatif à cette invention.

Un électro-aimant *a* (fig. 128) est fixé contre l'une des platines du mouvement d'horlogerie dont il s'agit d'entretenir la marche électriquement. L'armature *b* de cet électro-aimant est pivotée en *c* près de l'une de ses extrémités et porte près de l'autre l'axe d'un cliquet d'impulsion *e* qu'un ressort presse constamment contre la périphérie dentée d'une roue à rochet *g*. Cette dernière, montée à frottement doux sur l'axe *h* de l'un des mobiles du mouvement d'horlogerie, est cependant reliée à cet axe par l'intermédiaire d'un ressort *i* dit *ressort d'entretien*. Si donc la roue à rochet *g* tourne dans le sens de la flèche *k*, elle armera le ressort d'entretien qui, à son tour, fera tourner l'axe *h*, le train d'engrenage qui en dépend et la roue d'échappement *l* ; cette dernière entretiendra ainsi à son tour les oscillations de son pendule ou de son balancier régulateur.

Or on voit immédiatement que c'est précisément le cliquet d'impulsion *e* qui pousse, dans le sens de la flèche *k*, la dent de la roue à rochet *g* derrière laquelle il se trouve, cela tant et aussi longtemps que l'armature *b* s'éloigne des pôles de l'électro-aimant (inactif), sous l'influence de son ressort antagoniste *l* (fig. 128) ou de son contre-poids *u* (fig. 129).

Mais pendant ce mouvement de rotation de la roue *g*, son cliquet de retenue *m*, pivoté en *n* contre la platine du mécanisme, a été repoussé par le revers de celle des dents de la roue *g* contre laquelle il se trouvait, cela en surmontant la résistance du ressort *o* sur lequel il s'appuie par l'intermédiaire d'une goupille *p* en matière isolante.

Le ressort *o*, fixé sur la platine, est lui-même électriquement isolé de la masse de l'appareil, et son extrémité libre porte une goutte de platine (ou de tout autre métal peu oxydable), qui, lors de la chute du cliquet de retenue *m* dans le fond de la dent suivante, vient faire contact avec l'extrémité, également platinée, d'un second ressort *q* vissé sur l'armature *b*. Le ressort *o* est plus fort que le ressort *q*, ensorte qu'au moment où il tombe sur *q*, il fait céder ce dernier jusqu'à ce que *o* vienne lui-même buter contre la goupille isolée *o'*, et il éloigne ainsi le bout platiné de *q* de la vis également platinée *r* que porte un plot fixe isolé *s*.

L'un des pôles de la pile *t* du remontoir est relié au ressort de contact *o*, l'autre pôle au plot *s* et en même temps à l'un des fils de

l'électro-aimant *a*, enfin l'autre fil de ce dernier est relié à l'armature et par suite au ressort de contact *q*.

On voit qu'au moment où le ressort *o* est venu en contact avec le ressort *q* par suite de la chute du cliquet de retenue *m*, le courant de la pile *t* circule dans les bobines de l'électro-aimant *a* par le circuit fermé *t-o-q-b-a-s-t*. En conséquence *a* attire brusquement son armature *b* qui se rapproche des pôles de *a* en surmontant la résistance de son ressort antagoniste *l* (ou de son contrepoids *u*) et en le tendant ; le cliquet d'impulsion *e*, solidaire de l'armature, la suit dans ce mouvement et vient se placer derrière la dent suivante de la roue à rochet *g* ; enfin le ressort de contact *q*, également solidaire de l'armature *b*, glisse, avec sa partie platinée, le long de la goutte de platine du ressort *o* (la vis *r* restant toujours éloignée de *q* par suite de la force prépondérante de *o*), ce qui maintient fermé le circuit *t-o-q-b-a-s-t*. Toutefois, la partie platinée du ressort *q* a, dans le sens du mouvement, une longueur telle que son contact avec *o* cesse un peu avant que l'armature *b* ait fini sa course (limitée par les pôles de *a* avec interposition d'une mince couche d'un corps non-magnétique). A cet instant, le circuit *t-o-q-b-a-s-t* est rompu en *oq*, le courant cesse de circuler dans l'électro-aimant *a*, l'armature *b* se retrouve sous l'influence du ressort antagoniste *l*, pousse le cliquet d'impulsion *e* contre la dent de *g* et produit ainsi la rotation de *g* et de tous les mobiles suivants. En même temps le ressort de contact *q* n'étant plus poussé par *o* se remet en contact avec la vis *r*. Enfin, au fur et à mesure que l'armature *b* recommence à s'éloigner des pôles de *a* en pressant *e* contre la dent correspondante de *g*, cette dernière, en tournant, lève une seconde fois le cliquet de retenue *m*, et éloigne ainsi le bout du ressort fixe *o* avant que ce dernier ait pu être atteint par le ressort *q*, dans sa course autour du pivot *c* de l'armature *b*.

Lorsque la roue à rochet *g* a de nouveau tourné d'une dent, le cliquet de retenue retombe une seconde fois, et toutes les fonctions mentionnées ci-dessus recommencent ; elles se répètent ainsi périodiquement aussi souvent qu'une dent de la roue *g* passe et cela tant et aussi longtemps que la pile *t* peut fournir un courant capable de produire les attractions de l'armature *b*.

On voit que le contact de *q* avec *r*, qui a pour effet d'enfermer les bobines de l'électro-aimant dans un circuit *r-q-b-a-s-r*, n'est rompu que lorsque le contact principal *oq* est déjà fermé et en outre que *qr* se rétablit au moment de la rupture de *oq*. On obtient ainsi au commencement et à la fin du contact principal, le circuit auxiliaire dans

lequel circulent les extra-courants et l'on évite ainsi la production d'étincelles au contact *oq*.

Il y a lieu de mentionner ici le rôle très important joué par le ressort d'entretien *i*. En fait, c'est lui qui est le moteur direct du mouvement d'horlogerie, le ressort antagoniste *l* n'en étant que le moteur indirect. Si le ressort d'entretien *i* a un certain développement, il pourra contenir, une fois armé, une réserve de force accumulée qui pourra agir sur les rouages et continuer à les faire tourner pendant un certain temps, alors même que l'électro-aimant manquerait d'attirer son armature pour une raison ou pour une autre (courant devenu momentanément trop faible, poussière isolante accidentelle interposée entre les surfaces du contact *oq*, etc.). Cette réserve de force une fois dépensée, le ressort d'entretien est désarmé et les rouages s'arrêtent de tourner (et le balancier-régulateur d'osciller), si les mouvements intermittents de l'armature sont eux-mêmes totalement arrêtés

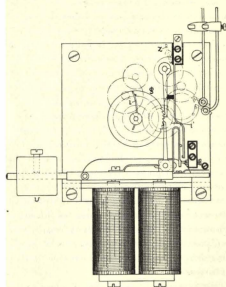


Fig. 129

(rupture de fil, pile épuisée, etc.). Mais si la cause qui a empêché le courant d'attirer l'armature *b* est écartée, ou bien, ce qui revient au même, si l'on rétablit le courant après l'avoir interrompu intentionnellement pendant un temps plus long que celui qui est nécessaire au désarmement total du ressort d'entretien *i*, les premiers mouvements de l'armature *b* ont d'abord pour effet d'armer le ressort d'entretien et ils le font en se succédant rapidement à la manière de ceux d'une sonnette électrique trembleuse

et grâce à la disposition spéciale du contact *oq*. Ces mouvements rapides ont lieu jusqu'à ce que le ressort d'entretien ait été suffisam-

ment armé pour solidariser l'axe h et la roue à rochet g ; à partir de ce moment, le régime normal est établi ou rétabli et les mouvements intermittents de l'armature sont désormais séparés par des intervalles de temps absolument égaux entre eux et dont la durée constante est un multiple du nombre des oscillations du pendule ou du balancier régulateur du mouvement d'horlogerie. Le nombre exprimant ce multiple peut être choisi à volonté, puisqu'il ne dépend que des rapports des engrenages intermédiaires (qui séparent l'axe h de l'axe de la roue d'échappement) et du nombre des dents de la roue à rochet.

Dans la figure 128, la roue à rochet g actionne un seul rouage ou train d'horlogerie à roue d'échappement par l'intermédiaire d'un seul ressort d'entretien. Mais la même roue à rochet peut, comme cela est représenté dans les figures 129 et 130, actionner deux rouages au moyen de deux ressorts d'entretien i et i' , le premier rouage étant celui de la roue d'échappement et des aiguilles d'une horloge à pendule ou à balancier, et le second rouage étant, par exemple, celui de sa sonnerie d'heures et des quarts ou autres fractions d'heure. Dans ce second rouage, le régulateur est un simple volant z déclenché aux moments voulus par le premier rouage, et le ressort d'entretien i' , renfermé dans un petit barillet et armé d'une manière uniforme par la roue g , dépense sa force en des temps qui varient selon le nombre des coups à frapper, mais dont le total en 12 heures est toujours périodiquement le même. Ce second rouage peut d'ailleurs être employé à n'importe quelle autre fonction que celle de sonner les heures, par exemple à produire les contacts interrupteurs (et, le cas échéant, inverseurs) commandant des cadrans électriques secondaires à minute, et alors l'horloge à laquelle on applique le remontoir électrique ici décrit, devient une horloge-mère. Remarquons ici que le contact oq peut lui-même commander directement un certain nombre de cadrans secondaires à émissions de courant toujours de même sens.

Dans les figures 129 et 130, le ressort antagoniste l des fig. 128 et 128bis est remplacé par un contrepoids u .

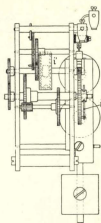


Fig. 130

Le remontoir électrique Favarg
n'importe quelles pièces d'horlogeri
dules d'appartement avec ou sans
mères électriques, aux pendules



Fig. 131

contact peuvent d'ailleurs fonction
sans avoir à subir aucun nettoyage
à la pile épuisée se fait en quelq
le bon fonctionnement de l'horlo
cette dernière est remarquable,
a été adapté le remontoir, soit

ceux, très ordinaires, que l'on fabrique en grandes séries dans la Forêt-Noire.

Horloge à remontoir de Cohen à Munich¹. — Le mécanisme de cette horloge a ceci de particulier que le poids entretenant le mouvement des mobiles est constitué par l'armature elle-même. Celle-ci a exactement la même disposition que l'électro-aimant proprement dit et chacun d'eux consiste en une traverse en fer doux *E* (respectivement *E'*, fig. 132) sur laquelle ont été rivés deux noyaux cylindriques *S*, *S'*, également en fer doux; les extrémités de ceux-ci, taillées en biseau, se font face deux à deux dans l'intérieur des bobines, comme l'indique clairement (en pointillé) le dessin *I* de la figure; l'armature affecte ainsi la forme d'un double plongeur. On voit sur le dessin *II* de la même figure le dispositif transmettant au premier mobile du rouage, le mouvement de chute lente de l'armature-poids. Au moment où celle-ci arrive à fin de course,

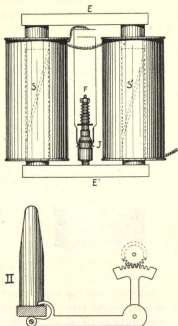


Fig. 132

le circuit des bobines de l'électro-aimant *E* est fermé automatiquement au moyen du dispositif à contact brusque *FJ*, dont le jeu se comprend à première vue. La disposition très ramassée de ce remontoir et la course relativement grande de son armature, le rendent propre à la commande des horloges de clocher.

L'horloge Kohler de Neustadt (Forêt-Noire) et celle de Auguste Anders (Charlottenbourg), se distinguent par la disposition que ces constructeurs ont donnée à leur électro-aimant remonteur, dispo-

¹ *Lehrbuch der Uhrmacherei*, Band V., von G. KRUMM, p. 274.

sition qu'on retrouve d'ailleurs aussi dans les remontoirs pour ressorts d'Aron, de Möller et d'autres inventeurs. Elle consiste à placer l'axe de l'armature pivotante *entre* les pièces polaires (convenablement formées ou même épanouies) des deux noyaux de l'électro-aimant. On obtient ainsi une course relativement grande et une attraction à intensité croissante de cette armature, qui augmentent la sûreté de son fonctionnement, lorsque les résistances mécaniques qu'elle doit vaincre, croissent elles-mêmes dans une proportion analogue.

Horloge à remontoir de Th. Wagner à Wiesbaden¹. — Cet inventeur a muni l'horloge-mère qu'il construit pour actionner ses réseaux de compteurs électrochronométriques, d'un remontoir

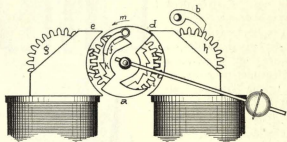


Fig. 133

à double poids et à chaîne sans fin dont les figures 133 et 134 donnent le détail. Comme cette horloge comprend deux mouvements d'horlogerie distincts, l'un actionnant mécaniquement la minuterie et les aiguilles, l'autre fermant à chaque minute les circuits des compteurs, il s'agissait de remonter simultanément les deux poids correspondants.

C'est l'armature *a* en forme de Z d'un électro-aimant à pièces polaires épanouies *e* et *d* qui constitue l'organe remonteur. Sur son axe est montée à frottement doux une roue dentée *i* sur laquelle est vissé un rochet *k*. Lorsque l'armature *a* tourne dans le sens de la flèche *m* sous l'influence des émissions de courant envoyées en même temps dans les compteurs et dans l'électro-aimant remonteur, elle entraîne avec elle, grâce au rochet *k* et au cliquet *f*, la roue dentée *i*.

¹ *Lehrbuch der Uhrmacherei*, Band V., von G. KRUMM, p. 283.

Celle-ci engrène avec les deux autres roues dentées g et h (fig. 133 et 134) dont le retour en arrière est empêché par le cliquet de retient b et qui sont solidaires des poulies p_1 et p_2 (fig. 134) autour desquelles passent les chaînes sans fin des deux poids mouflés l^1 et l^2 actionnant l'horloge-mère. Les remontages, qui ont lieu toutes les minutes, se font, grâce aux chaînes sans fin et aux deux poulies de renvoi o_1 et o_2 , sans que la pesanteur des poids l^1 et l^2 cesse d'agir sur les mobiles de leurs mécanismes respectifs. Ici, l'horloge électrique indépendante est utilisée non pas comme horloge secondaire, ainsi que c'était le cas pour l'horloge à remontoir *N. Z.* de la fig. 127, mais bien, cette fois, comme horloge-mère. C'est là une seconde constatation qui a son intérêt et dont nous trouverons, au cours de cet ouvrage, de nombreuses répétitions.

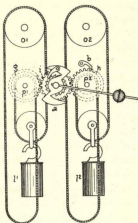


Fig. 134

*a₂) Horloges électriques à remontoir par électro-aimant
chez lesquelles l'organe remonté est un ressort.*

Généralités. — Un poids, employé comme moteur d'un mouvement d'horlogerie, a sur un ressort l'avantage de la constance de son action. Cette constance, en effet, n'existe pas dans le cas du ressort, ou du moins elle n'existe qu'à un certain degré, car il se produit en cet organe des déformations pendant qu'il actionne les rouages en se détendant et aussi pendant que le remontoir le tend. Ces déformations, même alors qu'elles n'ont lieu que moléculairement, à l'intérieur de la matière constituant le ressort, ont pour effet de modifier périodiquement (et quelquefois aussi non-périodiquement) la marche de la pendule dont ce ressort est le moteur. On conçoit facilement que plus la différence de force entre le ressort tendu et le ressort détendu est grande, plus la déformation est considérable, et plus aussi le changement de marche de la pendule est grand entre le commencement et la fin d'une période. Lorsque celle-ci a une longue

durée et dépasse 24 heures, comme c'est le cas, par exemple, chez les chronomètres de marine, il est nécessaire de munir ces instruments de précision d'un organe compensateur auquel on a donné le nom de *fusée* et qui est construit de telle façon que l'effort exercé par le ressort sur les rouages du mouvement d'horlogerie reste le même quel que soit le degré de tension de ce ressort, autrement dit, quel que soit le temps qui s'est écoulé depuis le dernier remontage.

Lorsqu'au contraire l'intervalle entre deux remontages successifs du ressort est court, comme c'est presque toujours le cas chez les horloges à remontoir électrique par électro-aimant, et ne dépasse guère quelques minutes au plus, on admet que la différence de force que possède le ressort lorsqu'il est à l'état tendu ou à l'état détendu est négligeable, à condition cependant que l'on prenne les précautions voulues pour réduire cette différence à un minimum. Il est d'ailleurs bon de rappeler ici qu'une marche variant légèrement pendant une période de courte durée, ne présente pas un grand inconvénient, puisqu'en fin de compte, c'est généralement la variation totale de l'horloge en 24 heures qui est importante et que cette variation totale est nulle lorsque les variations partielles qui pourraient exister entre les instants où le ressort est tendu et ceux où il est détendu, se compensent, ce qui est presque toujours le cas. Il n'est donc pas aussi important qu'on pourrait le croire à première vue, que les déformations périodiques du ressort soient très faibles ; il suffit qu'elles soient *constantes* pendant un grand nombre de périodes successives.

Les ressorts employés dans les horloges indépendantes à remontoir électrique, affectent diverses formes ; tantôt ils consistent, comme dans l'horloge de Breguet déjà décrite, en un spiral plat replié plusieurs fois sur lui-même ; tantôt ils ont, comme dans l'horloge Aron, la forme d'une lame à section plate, légèrement recourbée entre ses deux points d'attache ; tantôt enfin, ils se présentent sous l'aspect d'un boudin cylindrique à spires superposées et plus ou moins serrées, comme dans l'horloge David Perret (voir plus loin). Quand il affecte la forme d'un spiral plat, celui-ci est tantôt libre, tantôt enfermé dans un barillet.

Horloge à remontoir David Perret, Neuchâtel¹. — Sur les figures 135 et 135 bis, *R* est le ressort en forme de boudin du remontoir. L'extrémité gauche de ce ressort est attachée, au moyen d'une

¹ *Elektrotechnik für Uhrmacher*, von J. ZACHARIAS, p. 93.

lorsque sa course est près d'être terminée. Tôt après, le ressort plat D_1 fait, lui aussi, contact avec $e_1 B_1$ au moment précis où le

prisme g_1 du cliquet de retient b_1 , tombe derrière la dent du rochet F contre le plan incliné de laquelle il vient de glisser. Or les deux contacts $e_2 B_2$ et $e_1 B_1$ étant ainsi fermés en même temps, lancent le courant de la pile dans la bobine de l'électro-aimant A ; celui-ci attire l'armature a , le levier C se relève brusquement entraînant avec lui le cliquet C_2 ; g_2 vient se placer derrière la dent suivante du rochet F , le contact $e_1 B_1$ s'ouvre et interromp le circuit de A qui cesse d'attirer son armature a et ainsi de suite.

On voit que l'armature a passe lentement, sous l'influence de H , de la position attirée à celle non-attirée, les leviers C_1 et C_2 participant tous deux à ce mouvement lent. On constate en outre que le contact interrupteur du remontoir

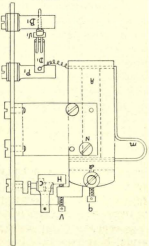


Fig. 135 bis

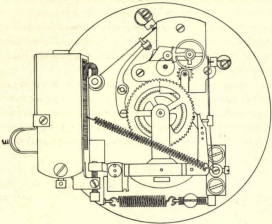


Fig. 136

Perret est en deux parties dont l'une, $v_1 B_1$, établit le circuit, et l'autre $v_2 B_2$ le rompt ; cette disposition a, selon l'inventeur, l'avantage de répartir entre deux points distincts, les risques d'oxydation provenant des étincelles d'extra-courants d'ouverture et de fermeture, ce qui permet d'espacer davantage les nettoyages des surfaces de contact. Signalons encore ici les précautions prises pour empêcher, au moyen du ressort m (fig. 135 bis et 136) en métal non-magnétique, le collement de l'armature a contre les pôles de l'électro-aimant A , et l'exactitude avec laquelle tous les organes mobiles peuvent être réglés soit dans leurs courses, soit dans leurs tensions, quand ils se présentent sous la forme de ressorts plats ou à boudin.

Le remontoir électrique David Perret a été appliqué aussi bien à des horloges de paroi dites « œil-de-bœuf », pourvues d'un échappement à balancier circulaire semblable à celui des montres de poche, qu'à des régulateurs de précision à balancier pendulaire et à échappement Graham. L'Observatoire de Neuchâtel possède deux pendules de précision du type David Perret exécutées par M. *Charles Rosat*. L'une d'elles, remise à l'heure chaque jour, transmet électriquement l'heure exacte aux différents centres horlogers du Jura suisse et à la Direction centrale des Télégraphes à Berne. Jusqu'en 1901 ce service du signal d'heure avait été fait par une pendule électrique *Shepherd* de Londres à réactions indirectes, qui a fonctionné pendant près de 40 années consécutives et qui est actuellement l'une des pièces intéressantes du Musée de l'Observatoire de Neuchâtel.

Une autre des pendules Rosat, type Perret, a présenté pendant un mois d'observations et de comparaisons quotidiennes, une variation diurne moyenne de huit centièmes de seconde.

Horloge à remontoir Aron (Charlottenbourg)¹. — Le remontoir électrique *Aron*, représenté par les figures 137, 138 et 139, a été appliqué avec succès dans les compteurs d'énergie électrique à double pendule de cet inventeur, compteurs qui, autrefois remontés manuellement, étaient souvent arrêtés par suite des oublis de remontage mais qui, une fois munis de remontoirs électriques automatiques, marchèrent avec une régularité remarquable.

Le fonctionnement du mécanisme Aron étant, en principe, analogue à ceux que nous avons déjà appris à connaître précédemment, nous nous abstenons d'en faire ici une description détaillée. Signalons-en seulement les particularités suivantes.

¹ *Elektrotechnik für Uhrmacher*, von J. ZACHARIAS, p. 81.

Le ressort remonteur, qu'on voit en *F*, a, comme nous l'avons déjà dit plus haut, la forme d'une lame plate à grande courbure unique ; les pièces polaires *E* de l'électro-aimant *B*, à une seule bobine, consistent en plusieurs lamelles de fer doux juxtaposées, de 1 mm. d'épaisseur, qui permettent d'employer le remontoir Aron, même dans le cas fréquent où le courant d'alimentation de l'électro-aimant est alternatif et à courte période. L'armature *A* (fig.

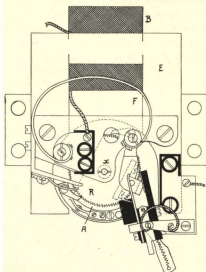


Fig. 137

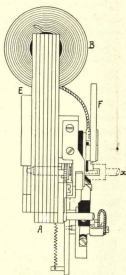


Fig. 138

139), en forme de Z, oscille autour de l'axe *x*, entre ces pièces polaires lamellées. Elle porte deux cliquets qui engrènent avec le rochet *R*, premier mobile du rouage à actionner. Le mouvement *aller* de l'armature s'opère brusquement sous l'influence du courant, mais son mouvement *retour* a lieu lentement en entraînant le rochet *R*. Le contact fermant le circuit du courant sur la bobine de l'électro-aimant, à la fin de chacun des mouvements de retour de l'armature, a lieu au moyen d'une petite bascule qui interrompt ce contact au moment où cette armature termine son mouvement brusque d'aller. On voit en bas à droite, sur les fig. 137 et 138, le dispositif de cette bascule dont le fonctionnement se devine aisément.

L'enroulement du fil de la bobine du remontoir Aron est différent selon que le courant qui doit l'alimenter est à bas ou à haut voltage. Lorsque ce courant est fourni par une pile de 1,5 à 3 volts,

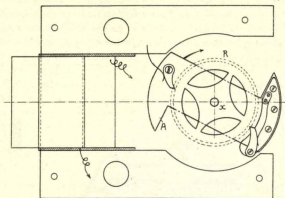


Fig. 139

la résistance du fil est de 75 à 150 ohms ; pour un voltage de 110 volts, elle est de 1250 ohms ; au-dessus de 110 volts, il faut intercaler, avant la bobine, des résistances supplémentaires.

Ne pouvant donner une plus grande extension au chapitre, déjà surchargé, des horloges à remontoirs électriques par électro-aimants, nous nous bornerons à mentionner, avant de le clore, les noms de quelques inventeurs et constructeurs ayant apporté leur contribution à cette classe d'appareils ; nous le ferons en donnant quelques indications rapides sur les principales caractéristiques de quelques-uns de ces mécanismes.

Dans l'horloge de *M. d'Arlincourt*, applicable aux monuments publics, aux gares de chemins de fer, aux grands bâtiments d'usines, etc., l'organe remonté est un poids suspendu à un fil passant sur la gorge d'une poulie. La chute lente de ce poids détermine, au moyen d'un cliquet approprié, le mouvement circulaire d'une roue à grand diamètre, ayant 360 dents, qui commande à son tour un pignon de 6 ailes, sur lequel est rivé une roue d'échappement de 30 dents. Celle-ci réagit de la manière connue sur un pendule battant la seconde. L'électro-aimant remonteur est excité, une fois

par minute, lorsque le poids, arrivé à fin de course, ferme un contact approprié facile à concevoir. L'armature de l'électro-aimant de l'horloge d'Arincourt a une disposition originale. Elle consiste en 8 barrettes de fer doux montées les unes à côté des autres, en face des deux pôles de l'électro-aimant, de façon à offrir l'aspect d'un éventail (fig. 140). A l'état de repos, la barrette inférieure est la plus rapprochée de ces pôles, et les autres s'en trouvent écar-

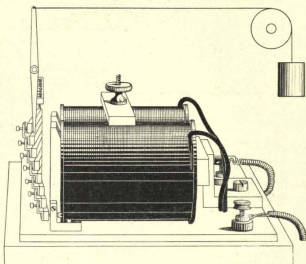


Fig. 140

tées graduellement jusqu'à sortir de leur champ d'action magnétique. Lorsque le courant traverse l'électro-aimant, la barrette inférieure obéit la première à l'attraction des pôles, et son mouvement provoque mécaniquement le rapprochement des 7 autres barrettes ; la seconde barrette, en subissant à son tour l'influence magnétique, provoque un second rapprochement mécanique du système mobile, et ainsi de suite jusqu'à la barrette supérieure¹. La succession très rapide de ces mouvements amène instantanément toutes les barret-

¹ Les détails ci-dessus sont tirés de l'ouvrage de M. P. DECRESSAIN, intitulé : *l'Horlogerie électrique à l'Exposition universelle de 1900*, ouvrage auquel l'auteur a fait encore ailleurs divers autres emprunts.

tes dans un même plan très voisin des pôles et le poids moteur est remonté. Dès que le courant est coupé, les 8 barrettes reviennent lentement à leurs positions non-attirées, en sorte que tout est prêt pour un nouveau remontage. La supériorité de l'électro-aimant d'Arlincourt avec armature à palettes multiples sur celui à armature pleine de même grandeur, est caractérisée par l'intensité du courant qui est nécessaire pour remonter un poids de même pesanteur dans les deux cas ; cette intensité est de deux à trois fois *plus faible* avec l'armature à palettes qu'avec l'armature ordinaire.

Dans le remontoir électrique *Favereau*, l'électro-aimant remonteur possède une armature qui, sous l'influence du courant, vibre à la manière de celles des sonnettes électriques trembleuses. Ce mouvement vibratoire est utilisé pour faire tourner d'un certain angle, au moyen d'un cliquet approprié, un rochet à fine denture qui remonte rapidement par saccades le poids moteur.

Les horloges électriques indépendantes avec remontoirs par électro-aimants à armature oscillante (en va-et-vient) autres que celles que nous avons décrites ici, sont extrêmement nombreuses. Citons encore parmi ces dernières : en Allemagne et Autriche, celles de Mayer, Neher fils (Munich), Möller (Berlin), Wimbauer (Baden en Autriche), Kohler (Neustadt en Forêt-Noire), Kuliska Antal (Budapest), Anders (Charlottenbourg), etc.; en France, celles de Barbey, Napoli, Regis, Mildé, etc.; en Suisse, celle de Schweizer; en Angleterre et aux États-Unis, celles de la Sempire Clock C^y, de l'Automatic Electric Clock C^y, etc.

b₁) Horloges électriques à remontoir par moteurs rotatifs à marche intermittente.

Généralités. — Nous entendons ici par *moteur rotatif*, un système électro-magnétique dont l'armature mobile, au lieu d'être oscillante et de fonctionner en va-et-vient, tourne continuellement dans le même sens. Cette rotation peut être produite soit par un courant continu, ou plus exactement dit, par des séries de courants toujours de même sens, se succédant très rapidement, soit par des courants alternatifs. Ceux-ci peuvent être discontinus, ou se succéder rapidement à courte période ; dans le premier cas, la rotation du moteur électrique est elle-même discontinue et se produit par sac-

cadres séparées l'une de l'autre par des intervalles relativement longs (une seconde, une minute, une demi-minute, etc.) ; dans le second cas, la rotation est continue, les émissions alternatives du courant moteur se succédant très rapidement dans l'induit mobile.

Horloge à remontoir rotatif Bohmeyer (Halle)¹. — Le moteur rotatif Bohmeyer est visible sur la droite de la figure 141. Sa partie fixe consiste en deux électro-aimants en forme de fer à cheval dont les quatre bobines sont reliées de telle façon que deux d'entre elles

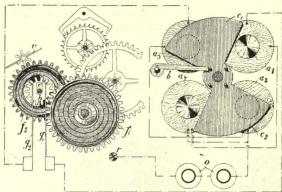


Fig. 141

seulement, celles qui sont en diagonale, soient actives en même temps, les deux autres étant au même instant privées de courant. La partie mobile de ce système, son armature, a la disposition indiquée sur la figure, soit celle d'un double segment en fer doux qui est monté sur un axe parallèle aux 4 bobines fixes et dont les positions par rapport aux 4 pôles de l'électro-aimant double sont telles que l'axe accomplisse un quart de tour chaque fois que l'un des deux électro-aimants est actif. Le cliquet *b* et les 4 goupilles correspondantes de l'armature tournante empêchent le recul de celle-ci.

Ce mouvement rotatif est transmis au moyen de roues et pignons, d'abord au barillet à ressort *f*₁, dont l'axe se confond avec celui de la roue de l'aiguille des minutes de l'horloge, puis à un second barillet plus petit *f*₂. Le ressort du premier barillet a pour fonction

¹ *Lehrbuch der Uhrmacherei*, vol. V, par G. KREUZ.

d'entretenir la rotation de la roue d'échappement ; le ressort du second opère, en se détendant, la rotation, par demi-tours, de l'axe *a* (fig. 142) qui, au moyen d'un doigt *e* (fig. 141) et des deux ressorts *g*₁ et *g*₂ (respectivement *b* et *c* de la fig. 142), lance le courant alternativement dans l'un ou l'autre des deux électro-aimants remonteurs. Chaque demi-tour de *a* a lieu rapidement, grâce à la roue qu'il porte et qui est munie des goupilles *f* et *g* (fig. 142). Ces goupilles sont libérées alternativement à chaque passage de l'une des dents de la roue à étoile *d* tournant avec le reste du rouage. Le volant *v* de la fig. 141 règle la rapidité de déroulement de la roue *g* et par conséquent la durée des contacts du doigt *e* avec les ressorts *g*₁ et *g*₂ (respectivement du doigt *a* avec les ressorts *b* et *c* de la fig. 142).

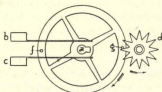


Fig. 142

Les remontages peuvent avoir lieu à des intervalles quelconques choisis d'avance et déterminés, selon les circonstances, au moyen des dentures appropriées du train d'engrenages. Les courants successifs envoyés dans le système électro-magnétique remonteur qui vient d'être décrit, peuvent être toujours de même sens, puisque l'armature mobile est en fer doux (non polarisée). Mais on pourrait très bien employer, à la place de celle-ci, une armature polarisée tournante analogue à celles de certains compteurs électro-chronométriques que nous apprendrons à connaître plus loin, et alors les émissions du courant remonteur seraient alternativement renversées, ce qui permettrait de remplacer les deux électro-aimants du système Bohmeyer par un seul, sans avoir d'ailleurs à modifier beaucoup son contact de la fig. 142.

Horloge à remontoir rotatif de Ferdinand Schneider (Fulda).

— Ici le moteur rotatif tourne rapidement, chaque fois qu'il est actif, sous l'influence d'émissions toujours de même sens se succédant à très courts intervalles par l'intermédiaire d'un collecteur à deux balais calé sur l'axe de l'armature tournante (induit). Une pile de deux éléments suffit à l'actionner.

L'organe remonté est un ressort spiral placé dans un barillet qui, en se détendant, actionne d'une part le train d'engrenages aboutissant à la roue d'échappement et à la minuterie des aiguilles, et d'autre part un mécanisme de sonnerie des heures et des quarts ou demies.

La figure schématique n° 143 fait comprendre à première vue la disposition du tout. 14 est le barillet, 17 son ressort, 21 la roue d'échappement avec son ancre 23 ; 24 est le cliquet de retient du barillet ; 11 est la roue des goupilles actionnant le marteau de sonnerie 25. Le moteur électrique qui se voit en 2 fait tourner, lorsqu'il est actif, le barillet 14 au moyen de deux poulies 3 et 5, d'un cordon de transmission 4 et des roues et pignons 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 et 15. Le barillet 14 est muni d'un « arrêtage » qui permet tout d'abord de n'utiliser que la partie médiane du ressort spiral (qui dans ce but est choisi relativement long), et ensuite d'éviter que son déroulement nécessairement inégal par suite des variations du nombre des coups frappés par la sonnerie des heures, combinées avec les intervalles égaux des remontages successifs, n'ait pour effet de laisser ceux-ci continuer à bander le ressort alors que ce dernier est déjà parvenu à son maximum de tension. Les remontages ont lieu, selon les types de sonneries, tous les quarts d'heure ou toutes les demi-heures. Les coups de marteau se donnent pendant que le moteur 2 est actif ; il est donc nécessaire que ce dernier s'arrête automatiquement, aussitôt terminée la série des coups de l'heure correspondante. Ceci

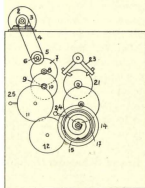


Fig. 143

nous amène à décrire le dispositif imaginé et réalisé par Schneider¹ pour obtenir ce résultat. Sur les figures 144 et 145 qui le représentent, on voit en *d* le râteau de sonnerie qui a la forme bien connue. Dans les dents de ce râteau engrène le levier de chute *f* qui est retenu par le levier *h*. La roue de renvoi *c* porte les deux goupilles chargées de lever, toutes les demi-heures, les leviers *G* et *h* et de libérer ainsi le râteau *d*. La roue des minutes *b*, qui engrène avec *c*, commande d'autre part le « limaçon » des heures (non dessiné sur la fig. 144). Sur la

platine *a* est pivoté le levier *i* à plusieurs bras, dont l'un porte le ressort de contact *l*, un autre, le ressort *n* s'appuyant sur la goupille *u* du râteau *d* (voir ici la fig. 145), et enfin un troisième *i* portant la gou-

¹ Cette description est tirée de l'ouvrage allemand : *Elektrische Uhren und Feuerwehr-Telegraphie*, du prof. TOBLER de Zurich, 2^{me} édition revue et augmentée par M. JOHANNES ZACHARIAS, ing. à Berlin (Hartleben, Wien).

pille *K*. Le ressort *q* fixé isolément sur la platine *a* est relié avec l'un des balais du moteur 2, l'autre balai étant lui-même relié avec l'un des pôles de la pile *w* par le massif de la platine. Le ressort non-

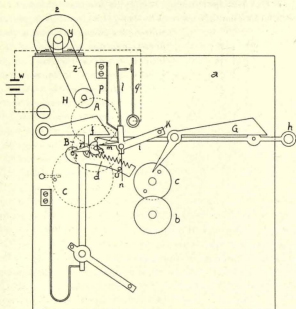


Fig. 144

isolé *p* presse contre le levier *i* et complète le circuit au moment du déclenchement

Sur l'axe de la roue *B* (fig. 144) sont calés le nez *r* et le disque entaillé *s*. Au repos, la pointe du nez *r* s'appuie contre la goupille *t* du râteau *d*; la goupille *u* est assez courte pour ne pas empêcher la rotation du nez *r*.

Sur l'axe prolongé du volant du train d'engrenages des roues *A*, *B* et *C*, est calée la poulie *H* que le cordon *z* relie avec la poulie *y* du moteur 2.

Voici quel est le fonctionnement de cet ensemble.

Une des deux goupilles de la roue de renvoi *c* lève lentement les leviers de déclenchement *G* et *h* qui, en levant à leur tour le levier *f*, libèrent le râteau *d*. Le ressort *n* du bras multiple *mil* qui, auparavant s'ap-

puyait contre la goupille *u* du râteau *d* (fig. 145) est libéré, en sorte que la goupille *K* s'appuie, sous l'influence du ressort *p*, sur le levier *h*. La roue continuant son mouvement de rotation, il arrive un moment où les leviers *G* et *h*, abandonnés par la goupille de *c*, libèrent le levier *mikl*, qui met alors en contact les ressorts *l* et *q*. Le circuit de la pile et du

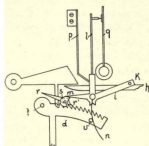


Fig. 145

moteur 2 étant ainsi fermé, ce dernier entre en action, ce qui a pour effet de faire lever davantage, par la partie excentrique de *s*, le bras *m* de *i* et d'augmenter encore la pression des deux ressorts de contact *l* et *q*. La pointe du nez *r* engrène à chaque tour successivement dans les dents du râteau *d* et relève peu à peu celui-ci jusqu'à ce que la dent d'arrêt du levier *f* tombe, de la manière connue, dans la dernière des dents du râteau *d*. A ce moment la goupille *u* rentre en contact

avec le ressort *n*, tend celui-ci avec force, le bras *m* se trouvant encore sur la partie excentrique de *s*. Le contact entre les ressorts *l* et *q* subsiste jusqu'à ce que le bras *m*, abandonné par la saillie de *s*, cesse brusquement d'appuyer *l* contre *q*, ce qui a pour effet de rompre le circuit et d'arrêter le moteur 2. Le rouage, lancé, tourne encore quelque peu, mais il s'arrête complètement au moment où *r* rencontre la goupille *t* du râteau *d*.

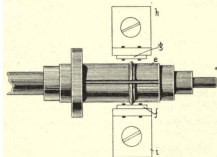


Fig. 146

délicate, à savoir le collecteur à balais, ne puisse se déranger. La figure 146 représente ce collecteur vu d'en haut et la figure 147, vu en bout ; *g* et *f* sont les ressorts frotteurs montés sur les équerres fixes *h* et *i* ; ces ressorts sont en acier poli ; ils frottent contre les segments *e*

d'un collecteur circulaire en plusieurs parties fixées autour d'un anneau en matière isolante. Les parties frottantes de ces segments *e* sont des saillies relativement aiguës d'un anneau en argent, soudé sur le collecteur, puis coupé de traits de scie en même temps que le tuyau segmenté. Le frottement entre ressorts et collecteur est ainsi réduit à un minimum, tout en assurant un bon contact.

M. Ch. Poncet, le distingué directeur de l'*École nationale d'horlogerie de Cluses*, en Savoie, a exposé en 1900, à Paris, une horloge avec remontoir électrique par moteur rotatif, type Gramme, qui sonnait les heures et les quarts. Celle-ci résolvait ainsi, avant celle de M. Ferdinand Schneider, le problème que ces deux inventeurs s'étaient posé indépendamment l'un de l'autre. L'horloge de M. Poncet est décrite, aux pages 87 et suivantes de l'ouvrage, déjà cité ici, de M. P. Decressain : *L'Horlogerie électrique à l'Exposition universelle de 1900*.

Il y a lieu de mentionner encore, comme rentrant dans la présente catégorie *b*₁), l'horloge à remontoir de la *Société Electric-Silentia de Besançon*, que M. Albert Berner a décrite aux pages 195 et suivantes de son *Initiation de l'horloger à l'électricité*, et qui présente cette particularité de pouvoir fonctionner aussi comme horloge réceptrice.

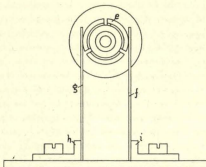


Fig. 147

Application du remontoir électrique aux horloges de clochers.

Généralités. — Nous avons vu, par les exemples des horloges Wagner et d'Arlincourt, comment un ou plusieurs poids suspendus à des poulies par des cordons ou des chaînes, pouvaient être remontés automatiquement à intervalles réguliers relativement courts, par l'armature oscillante ou tournante d'un électro-aimant. De là à appliquer l'électricité au remontage du ou des poids des gros mouvements d'horloges monumentales, il n'y avait qu'un pas qui a été rapidement franchi. Mais alors on a vite compris qu'il y avait

avantage à remplacer l'électro-aimant de forme habituelle, à rendre plus ou moins faible, par un ou plusieurs moteurs électriques rotatifs branchés sur le réseau urbain d'éclairage ou de force.

Cette solution d'un problème qui se présente fréquemment dans la pratique, parce que les horloges de clochers ou de fronton sont ordinairement installées à une grande hauteur au-dessus du sol et que dès lors leur remontage à la main nécessite l'ascension pénible et fatigante de nombreuses marches d'escaliers ou parfois même d'échelles peu confortables, est simple et relativement peu coûteuse. Elle permet en effet de conserver intacts les robustes mécanismes des horloges de tour (avec échappements à balancier pendulaire et avec ou sans sonneries des heures), les seuls qui puissent marcher, avec la sûreté voulue, dans des conditions, souvent très défavorables, d'exposition et de résistances mécaniques. On sait en effet combien doivent être lourds les poids moteurs de ces mécanismes, lorsque les aiguilles à actionner sont elles-mêmes longues et pesantes (elles doivent résister à des pressions de vent parfois considérables), ou lorsque les marteaux des sonneries doivent frapper sur des cloches souvent très grandes, des coups retentissants perceptibles à plusieurs kilomètres de distance. Actuellement, le remontage de ces poids moteurs, même les plus lourds, peut être effectué avec la plus grande facilité au moyen de moteurs électriques de puissances relativement faibles (0,5, 1, 2 chevaux au plus). Le problème se réduit alors à adapter au mécanisme ordinaire des horloges monumentales, un dispositif de contact robuste, fermant et coupant automatiquement, aux moments voulus, le circuit du ou des moteurs électriques remonteurs.

L'emploi d'un remontoir électrique à moteur rotatif intermittent, permettant des remontages relativement fréquents (toutes les heures, par exemple), la *course* des poids moteurs d'une horloge de clocher peut être considérablement réduite, et alors il n'est plus nécessaire de disposer, soit au-dessous, soit à côté du mécanisme, d'espaces verticaux aussi grands que c'est le cas lorsque les poids doivent être remontés toutes les 24 heures ou tous les 8 jours. Le remontoir électrique permet ainsi de réduire la course normale des poids à quelques décimètres, soit à peine la hauteur des pieds supportant les mécanismes. Il est bon cependant de prévoir une hauteur de chute passablement plus grande pour le cas, toujours possible, où le courant urbain de lumière ou de force venant à manquer momentanément, le moteur électrique resterait inactif pendant une ou plusieurs périodes de remontages. Il faut que la *durée* d'un remontage qui se produit après

un ou plusieurs *ratés* du courant ou du moteur, puisse automatiquement se prolonger de toute la quantité correspondant aux remontages ratés ; on réalise facilement cette dernière condition en disposant le contact interrupteur automatique de telle façon que le circuit du moteur reste fermé tant et aussi longtemps que les poids n'ont pas tous atteint leur niveau le plus élevé.

On trouvera dans les lignes qui suivent quelques exemples typiques de remontoirs pour horloges monumentales.

Système Château (Paris)¹. — Ici le poids P à remonter est suspendu, comme l'indique la figure 148, à une chaîne de Galle sans fin qui porte un contrepoids tendeur p et s'enroule d'une part autour de deux poulies fixes, et d'autre part autour d'une poulie montée sur le premier axe du rouage de l'horloge. Le moteur rotatif M actionne la poulie fixe L au moyen d'un cordon ou d'une chaîne de transmission également sans fin. Sur l'axe de la poulie L est calé un rochet à cliquet qui permet la descente du poids P lorsque le moteur M est au repos.

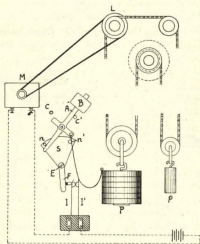


Fig. 148

Le fonctionnement et l'arrêt du moteur sont obtenus au moyen d'un dispositif mécanique composé d'un *basculateur* AB

et d'un interrupteur FII' . Le basculateur est constitué par un levier A en forme de croix, mobile autour d'un axe fixe. Le bras supérieur est muni d'une masse B qui élève le centre de gravité de la pièce au-dessus de son centre de rotation, afin que le tout ne puisse prendre une position d'équilibre stable que sur l'une ou l'autre des butées de repos C ou C' .

A l'opposé de la masse B , la queue du basculateur s'engage entre

¹ *L'Horlogerie électrique à l'Exposition de 1900*, par P. DECRESSAIN.

deux plots n et n' fixés sur un secteur S tournant à frottement assez dur autour d'un tenon E . Cette pièce constitue l'interrupteur ; elle porte à la partie inférieure un bras muni d'une saillie F , isolée électriquement, qui établit et coupe, suivant le cas, le courant du moteur.

La commande du basculeur, et par conséquent de l'interrupteur II' et du moteur M , se fait automatiquement par le poids moteur P , au moyen d'un cordon souple qui relie ce poids avec la branche transversale du basculeur. On comprend, à la seule inspection de la figure 148, que selon que le poids P est dans sa position la plus haute ou à son niveau le plus bas, le cordon souple se tend et agit sur le basculeur pour le faire buter tantôt sur n , tantôt sur n' , autrement dit pour fermer ou ouvrir alternativement le contact II' mettant en action ou arrêtant le moteur M .

Système Favarger & C^e (Neuchâtel). — Ce système, qui a été appliqué en Suisse à diverses grandes horloges de fronton, notam-

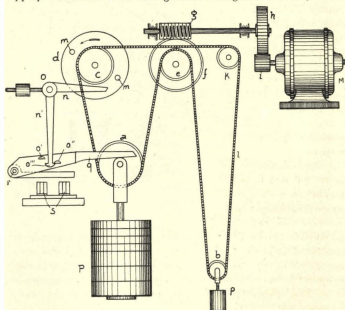


Fig. 149

ment à la nouvelle gare C. F. F. de Lausanne où il est muni en outre d'un dispositif de remise à l'heure automatique, est représenté sché-

matiquement dans la figure 149, qui se comprend à première vue.

Le poids à remonter P et son contre-poids tendeur p sont suspendus par leurs poulies de mouflage a et b à une chaîne de Galle sans fin ; celle-ci s'enroule, en outre, d'une part autour d'une poulie c calée sur l'axe du premier mobile d du rouage de l'horloge et, d'autre part, sur une quatrième poulie e dont l'axe porte une roue de vis sans fin f munie d'un encliquetage et dans les dents de laquelle engrène la vis sans fin g . Cette dernière est commandée, au moyen de la roue dentée h et de son pignon i , par le moteur électrique rotatif M , et tourne lorsque ce dernier est actif. Enfin la poulie K donne, au dernier brin descendant l de la chaîne sans fin, la direction de la poulie b du contre-poids p .

Sur la roue dentée d , qui a une vitesse de rotation donnée, sont fixées 1, 2, 3 (ou plus) goupilles m , selon que les remontages doivent avoir lieu toutes les six, ou trois, ou deux, etc., heures. Chacune de ces goupilles m communique, en passant, au levier à deux branches nn' , un mouvement de va-et-vient autour de son axe fixe o , mouvement qui a pour effet, — grâce à l'espèce d'échappement à deux crans que constituent les deux prismes d'acier poli o' et o'' d'un levier q pivoté en r et le prisme analogue o''' de nn' , — de déclancher q et par suite de produire la fermeture brusque d'un robuste contact-interrupteur bipolaire à déclic s . C'est cette fermeture qui lance le courant urbain dans le moteur électrique M ; celui-ci entre alors en action et remonte le poids P au moyen de la vis sans fin g et de sa roue à cliquet f . Au moment où le poids P arrive à sa position la plus haute, l'extrémité supérieure de son support pousse, de bas en haut, le levier q , le recroche sur le prisme o''' du levier n' et provoque, tôt après, la mise hors contact brusque de l'interrupteur à déclic s , ce qui rompt le courant du moteur M . Celui-ci s'arrête au bout de quelque temps, sans que les tours supplémentaires qu'il fait encore après cette rupture présentent un inconvénient quelconque.

Système à rouage différentiel ou à satellite de J. et A. Ungerer à Strasbourg¹. — Dans les remontoirs pour horloges monumentales que nous venons de décrire, le poids à remonter est suspendu à un système de poulies par un cordon ou chaîne de Galle sans fin dont un petit contrepoids tendeur assure le fonctionnement correct. Cette disposition présente cet avantage que la force motrice du poids agit sur le rouage de l'horloge, même pendant que le moteur électrique,

¹ G. Krumm, p. 288.

deux plots n et n' fixés sur un secteur S tournant à frottement assez dur autour d'un tenon E . Cette pièce constitue l'interrupteur; elle porte à la partie inférieure un bras muni d'une saillie F , isolée électriquement, qui établit et coupe, suivant le cas, le courant du moteur. La commande du basculeur, et par conséquent de l'interrupteur II' et du moteur M , se fait automatiquement par le poids P , au moyen d'un cordon souple qui relie ce poids avec la branche transversale du basculeur. On comprend, à la seule inspection de la figure 148, que selon que le poids P est dans sa position la plus haute ou à son niveau le plus bas, le cordon souple se tend et agit sur le basculeur pour le faire buter tantôt sur n , tantôt sur n' , autrement dit pour fermer ou ouvrir alternativement le contact II' mettant en action ou arrêtant le moteur M .

Système Favarger & Co (Neuchâtel). — Ce système, qui a été appliqué en Suisse à diverses grandes horloges de fronton, notam-

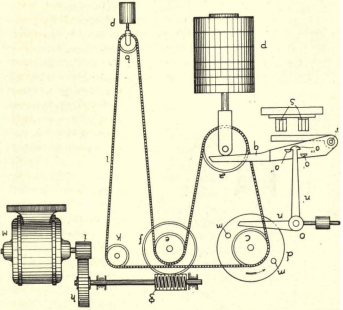


Fig. 149

ment à la nouvelle gare C. F. F. de Lausanne où il est muni en outre d'un dispositif de remise à l'heure automatique, est représenté sché-

matiquement dans la figure 149, qui se comprend à première vue.

Le poids à remonter P et son contre-poids tendeur p sont suspendus par leurs poulies de mouflage a et b à une chaîne de Galle sans fin ; celle-ci s'enroule, en outre, d'une part autour d'une poulie c calée sur l'axe du premier mobile d du rouage de l'horloge et, d'autre part, sur une quatrième poulie e dont l'axe porte une roue de vis sans fin f munie d'un encliquetage et dans les dents de laquelle engrène la vis sans fin g . Cette dernière est commandée, au moyen de la roue dentée h et de son pignon i , par le moteur électrique rotatif M , et tourne lorsque ce dernier est actif. Enfin la poulie K donne, au dernier brin descendant l de la chaîne sans fin, la direction de la poulie b du contre-poids p .

Sur la roue dentée d , qui a une vitesse de rotation donnée, sont fixées 1, 2, 3 (ou plus) goupilles m , selon que les remontages doivent avoir lieu toutes les six, ou trois, ou deux, etc., heures. Chacune de ces goupilles m communique, en passant, au levier à deux branches nn' , un mouvement de va-et-vient autour de son axe fixe o , mouvement qui a pour effet, — grâce à l'espèce d'échappement à deux crans que constituent les deux prismes d'acier poli o' et o'' d'un levier q pivoté en r et le prisme analogue o''' de nn' , — de déclancher q et par suite de produire la fermeture brusque d'un robuste contact-interrupteur bipolaire à déclie s . C'est cette fermeture qui lance le courant urbain dans le moteur électrique M ; celui-ci entre alors en action et remonte le poids P au moyen de la vis sans fin g et de sa roue à cliquet f . Au moment où le poids P arrive à sa position la plus haute, l'extrémité supérieure de son support pousse, de bas en haut, le levier q , le recroche sur le prisme o''' du levier n' et provoque, tôt après, la mise hors contact brusque de l'interrupteur à déclie s , ce qui rompt le courant du moteur M . Celui-ci s'arrête au bout de quelque temps, sans que les tours supplémentaires qu'il fait encore après cette rupture présentent un inconvénient quelconque.

Système à rouage différentiel ou à satellite de J. et A. Ungerer à Strasbourg¹. — Dans les remontoirs pour horloges monumentales que nous venons de décrire, le poids à remonter est suspendu à un système de poulies par un cordon ou chaîne de Galle sans fin dont un petit contrepoids tendeur assure le fonctionnement correct. Cette disposition présente cet avantage que la force motrice du poids agit sur le rouage de l'horloge, même pendant que le moteur électrique,

¹ G. KRUMM, p. 288.

devenu actif, opère le remontage de ce poids. Or, dans un grand nombre de mécanismes d'horloges de tour, existantes ou à créer de toutes pièces, la corde ou le câble supportant le poids s'enroule, en spires serrées, sur un tambour calé sur l'axe de la première roue dentée *e* (fig. 150 et 151) du train d'engrenages. Cette roue elle-même

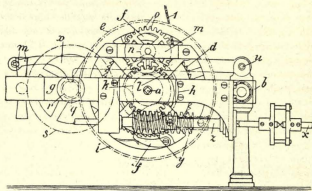


Fig. 150

peut tourner à frottement doux sur cet axe avec lequel elle est cependant reliée par l'intermédiaire du système d'encliquetage que chacun connaît et qui est visible en *def* sur les figures 150 et 151. Il résulte de cet arrangement que, pendant sa chute, le poids fait tourner la roue dentée *e*, grâce à l'encliquetage, et que, pendant son remontage, qui a lieu lorsqu'on fait tourner l'axe du tambour, soit à la main, au moyen d'une manivelle et du carré de remontage *a*, soit automatiquement, au moyen d'une vis sans fin *y* et de sa roue *l* calée sur cet axe, ce dernier, grâce au même encliquetage, tourne sans entraîner en sens inverse la roue dentée *e*. Un fort ressort dit *d'entretien*, ordinairement disposé près de l'encliquetage, assure la continuation de la rotation de la roue *e* dans le sens normal pendant le remontage du poids.

Voici comment la maison Ungerer a appliqué le « rouage différentiel » à ses horloges de tour à tambour. Ce rouage est représenté schématiquement sur la figure 152 et au naturel (à l'échelle) sur les figures 150 et 151.

h est une roue dentée calée sur l'axe *a* du tambour *e* ; *l* est la roue de vis sans fin et *k* un pignon denté solidaire de *l* ; *k* et *l* sont montés tous deux à frottement doux sur l'axe *a* ; *y* est la vis sans fin qu'ac-

tionne le moteur électrique (non représenté sur les figures) quand il est actif. La grande roue dentée *i*, qui reçoit son mouvement du pignon *q* calé sur le second axe *p* du rouage de l'horloge, porte les roues dentées *o* et *n* du rouage différentiel ; *o* engrène avec le pignon *k* de la roue de vis sans fin et *n* avec la roue *h*.

Pendant le remontage du poids, la roue *i* est arrêtée par le pignon *q*, tandis que la rotation de *k* entraîne le tambour en sens inverse. Le poids une fois remonté, le moteur s'arrête automatiquement sous l'influence d'un contact-interrupteur (non décrit ni représenté ici), et la roue de vis sans fin *l* redevient immobile.

Pendant la chute du poids, le rouage différentiel est entraîné avec le tambour *e*, grâce au pignon qui fait tourner la roue *i* dans le même sens que la roue de tambour *e*. En choisissant convenablement les

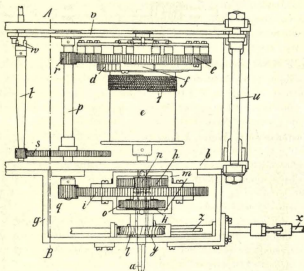


Fig. 151

dentures des roues et pignons du rouage différentiel, on arrive à ce résultat que la roue *o* (dite roue *satellite*), tourne autour du pignon *k* sans le faire tourner lui-même.

Presque chaque fabricant d'horloges monumentales a son système de remontoir électrique. Citons ici parmi eux : la maison C.-F. Roch-

litz, à Berlin ; J.-F. Weule, à Bockenem ; Georg Hartmann, successeur de Mannhardt, à Munich ; les Fils de Neher, à Munich ; Gustav Krumm, à Vienne ; C. Weiss, à Glogau ; Baer, à Sumiswald (Suisse), etc., etc.

Nous ne pouvons nous occuper ici de tous ces systèmes et nous nous contenterons de décrire encore celui de C. Weiss, à Glogau, qui pré-

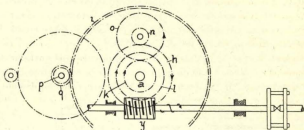


Fig. 152

sente diverses particularités intéressantes aussi bien au point de vue mécanique qu'au point de vue électrique. Notre description est empruntée à l'ouvrage de M. l'Ingénieur Johannes Zacharias, de Berlin : *Elektrotechnik für Uhrmacher*, ouvrage auquel nous avons encore fait, avec la permission de l'auteur, d'autres emprunts.

Système de C. Weiss, à Glogau. — Le mécanisme de cette horloge (fig. 153) comprend, en plus du mouvement des aiguilles, capable de desservir quatre cadrans de 2 m. de diamètre, deux autres mouvements actionnant, l'un le marteau des heures, qui frappe sur une cloche de 1500 kg., et l'autre, les deux marteaux des quarts, qui frappent sur deux cloches plus petites.

Les différentes pièces constituant le remontoir électrique, y compris le moteur rotatif, forment un tout qui peut être envisagé indépendamment du mécanisme de l'horloge proprement dite et qu'on peut, selon les circonstances, adjoindre ou non à celui-ci.

La transmission du mouvement du moteur électrique *M* aux trois tambours des poids, a lieu par l'intermédiaire de l'arbre *W* et de trois paires de roues coniques K_1K_2 et K_3 . Les plus petites de ces roues tournent à frottement doux sur l'arbre *W*. Chacune d'elles est pourvue d'un appareil de couplage électromagnétique $T_1T_2T_3$, dont les électro-aimants, en forme de cylindres, peuvent être excités indépendamment les uns des autres, et aux moments voulus, par des dérivations du courant d'excitation du moteur *M*. Quand ces électro-

aimants sont sous courant, ils solidarisent les petites roues coniques avec l'arbre *W*, qui produit alors le remontage des poids. L'amenée du courant aux électro-aimants de couplage se fait par les anneaux à frotteurs *s* ; 0,05 ampère suffisent à exciter chacun d'eux.

Les remontages successifs s'effectuent à raison d'un par heure. L'espace existant entre les jambes du support du mécanisme offre une hauteur de chute suffisante pour les trois poids ; il comprend même une réserve de trois heures de marche pour le cas où le courant de remontage manquerait une ou deux fois. Il va de soi que si l'on dispose, au-dessous du plancher sur lequel repose le support du mécanisme, d'une hauteur de chute supplémentaire, cette réserve de trois heures s'accroît en proportion.

Le courant du moteur *M* est automatiquement coupé, dès que les trois poids ont été entièrement remontés ; un ou plusieurs « ratés » qui se seraient produits dans l'intervalle de deux remontages normaux, n'apporteraient ainsi aucune perturbation permanente, les remontages manqués étant automatiquement compensés par un remontage ultérieur prolongé en durée. Comme le déroulement des

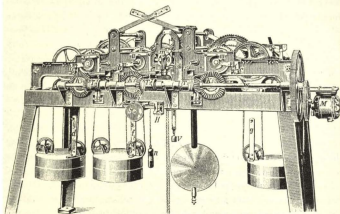


Fig. 153

poids n'est pas identique pour tous les trois, en raison de l'inégalité des nombres de coups de marteaux frappés en une heure, les interrupteurs *abc*, qui peuvent agir indépendamment les uns des autres, sont organisés, par rapport aux couplages électro-magnétiques et aux

colonnes de choc *fdg* des poids, de telle façon que les électro-aimants $T_1T_2T_3$ ne soient excités qu'aux moments voulus, autrement dit, cessent d'être sous courant et par suite suppriment la liaison de $K_1K_2K_3$ avec l'arbre *W*, successivement au fur et à mesure que chacun des trois poids arrive à sa position la plus élevée.

Par contre, le moteur *M* continue à tourner tant et aussi longtemps qu'un seul des trois poids n'est pas arrivé à cette position. Pour cela, le circuit de *M* est commandé par un commutateur spécial *H*, qui est lui-même actionné par un disque à excentrique *S*. Celui-ci est placé sur l'axe prolongé de l'un des mobiles de l'horloge faisant un tour en une heure.

Voici comment fonctionne cet ensemble : tôt avant la fin du précédent remontage, les colonnes de choc *fdg* ont successivement ouvert les interrupteurs *abc* ; mais tôt après, par suite du déroulement des poids, des disques à goupilles *I, II, III*, calés sur les arbres prolongés des tambours, les ont de nouveau fermés ; toutefois, la mise sous courant des électro-aimants de couplage $T_1T_2T_3$ et du moteur *M*, ne peut pas encore avoir lieu à ce moment, parce que l'interrupteur général *H* a été auparavant ouvert, environ dix minutes après la fin du précédent remontage, par l'excentrique *S*. Ce n'est que lorsque celui-ci a accompli un tour complet et que le nez *i* est tombé dans l'entaille de cet excentrique, c'est-à-dire tôt après que le dernier coup de marteau de l'heure a été frappé, que l'interrupteur *H* se ferme brusquement et met en action, d'une part, les trois coupleurs $T_1T_2T_3$ et, d'autre part, le moteur *M*, qui commence alors à remonter en même temps les trois poids. La durée totale d'un remontage est de 18 secondes.

On voit, d'après ce qui précède, que tous les mouvements *lents* des divers commutateurs *a, b, c* et *H* se font alors qu'aucun courant ne circule encore dans le circuit et que seule leur fermeture *brusque* se fait sous courant. Cette disposition a pour effet de réduire au minimum les étincelles et de conserver longtemps intactes les surfaces de contact. Les interrupteurs sont eux-mêmes d'une construction très robuste.

Le mouvement qui commande les aiguilles des cadrans est muni d'un remontoir d'égalité qui assure une marche très satisfaisante de l'horloge et qui est commandé par un petit poids spécial *n* de 750 gr. Ce petit poids est remonté en même temps que les autres. Le second petit poids que l'on voit en *V* commande un contact à minutes *m* qui fait de l'horloge de tour une horloge-mère capable d'actionner un certain nombre de compteurs électrochronométriques.

b₂) Horloges électriques à remontoir par moteur rotatif à marche continue.

Généralités. — Dans les horloges indépendantes qui se remontent électriquement au moyen d'un moteur rotatif à marche intermittente, le mécanisme doit ouvrir et fermer automatiquement, à périodes fixes ou variables, le contact-interrupteur commandant le moteur. On a cherché à supprimer ce contact qui est incontestablement, ainsi que nous l'avons vu, une cause de complication. Or celle-ci cesse d'exister, si le moteur, au lieu d'avoir une marche intermittente, a une marche continue.

Une horloge est, par définition, un mécanisme qui ne doit jamais s'arrêter, puisque le *temps*, qu'elle mesure, est lui-même quelque chose qui coule toujours, qui ne s'arrête jamais et qu'il faut cependant toujours connaître et mesurer. Si donc, pour actionner une horloge, on a à disposition une force continue capable d'agir directement et sans interruption sur sa roue d'échappement et sur son régulateur, comme c'est le cas avec un moteur électrique, et comme ce serait le cas aussi avec un poids que l'on n'aurait jamais besoin de remonter, pourquoi ne pas supprimer tout simplement l'intermédiaire à marche intermittente, le contact qui tantôt actionne et tantôt arrête ce moteur ?

C'est là le raisonnement qu'a sans doute tenu M. Thury, de Genève, lorsqu'il a imaginé et réalisé son horloge électrique à moteur. Il a même poussé cette idée plus loin encore que nous ne venons de le faire et il a supprimé du même coup l'échappement et son régulateur oscillant ; car il est illogique d'interposer entre l'organe *utile* de l'horloge, — qui est, en fin de compte, la minuterie faisant *tourner*, toujours dans le même sens, les aiguilles sur le cadran, et le moteur qui est lui-même *tournant*, — des organes intermédiaires ou accessoires animés de mouvements de va-et-vient.

Et c'est ainsi qu'a pris naissance en 1899 l'horloge Thury.

Horloge Thury. — La figure 154 donne la vue d'ensemble de cet instrument, la figure 155 une coupe verticale et un schéma, enfin la figure 156 le schéma général (avec réceptrice) de ce système.

Le moteur employé est du type Gramme à axe vertical, dont l'induit est fixe et l'inducteur mobile, ensorté qu'à l'inverse de ce qui a lieu habituellement, ce sont les deux balais qui tournent autour du collecteur. « On trouve à cela, écrit Bouasse dans *Pendule, Spiral, Diapason*, vol. II, p. 294, une facilité plus grande pour équilibrer la

partie tournante par rapport à son axe. Le courant est amené par deux anneaux fixes, isolés, sur lesquels frottent deux balais supplémentaires. Une partie du courant fourni par la source va dans l'électro qu'elle aimante ; le reste passe dans l'anneau Gramme fixe. Reste, dit le même auteur, à régler l'horloge-mère. » Et c'est ici que réappa-

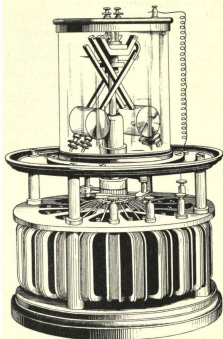


Fig. 154

rait le contact. On l'avait bien éliminé en tant qu'organe de mise en marche et d'arrêt du moteur, mais on est obligé de recourir de nouveau à ses bons offices, pour coopérer au réglage du moteur. De même, on avait espéré pouvoir se passer du pendule oscillant des horloges ordinaires, et voilà qu'il faut remplacer celui-ci par un double pendule à la fois oscillant et rotatif.

L'électro-aimant mobile *d* (fig. 155) porte deux enroulements bobinés en sens inverse, dont l'un est continuellement sous courant, tandis que l'autre, celui qui sert

au réglage, n'est excité que lorsqu'un contact *p*, situé à la partie supérieure de l'instrument, est fermé. Cette fermeture a lieu elle-même aussi longtemps que la vitesse de l'axe vertical du moteur est normale, et cela grâce au pendule conique à deux branches et à bras croisés qui tourne avec cet axe. Cette vitesse vient-elle, pour une raison ou pour une autre, à dépasser la normale, les bras du pendule conique s'écartent par l'effet de la force centrifuge, et le contact est interrompu. Cette interruption coupe le courant de

l'enroulement de réglage ; cet enroulement étant bobiné à l'inverse de l'autre, le champ magnétique de l'aimant tournant se *renforce* et la vitesse tend à diminuer. Si, au contraire, la vitesse du moteur tombe au-dessous de la normale, les masses *t* et *u* du pendule se rapprochent, rétablissent le contact *p*, font passer le courant dans l'enroulement de réglage ; le champ de l'électro-aimant tournant diminue et la vitesse augmente. Les petites fluctuations de vitesse, qui pourraient se produire entre deux réglages successifs, sont évitées en donnant aux masses *t* et *u* du pendule conique, un poids relativement grand. Il n'y a pas à craindre une détérioration des surfa-

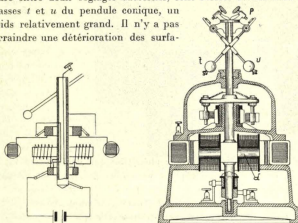


Fig. 155

ces du contact *p* par les étincelles d'extra-courant, parce que le circuit principal d'excitation est toujours fermé et que les courants d'induction qui s'y développent, aux moments des ruptures éventuelles du circuit de réglage, agissant en sens inverse sur ce dernier, réduisent à une quantité négligeable la force électromotrice induite correspondante.

L'horloge Thury, telle qu'elle vient d'être décrite, peut très facilement être employée comme horloge-mère capable d'actionner à distance un certain nombre d'horloges secondaires. Il suffit pour cela d'attacher trois fils en trois points de l'anneau fixe, distants entre eux de 120 degrés (fig. 156), les autres extrémités de ces fils aboutissant à trois bornes telles que *r* ménagées sur les réceptrices. Celles-ci consistent : 1^o en un aimant en forme de fer à cheval qui est monté sur pivots et qui actionne la minuterie et les aiguilles, et 2^o en trois

bobines fixes ayant un fil commun et trois fils attachés intérieurement aux trois bornes dont nous venons de parler. Le montage peut être fait en triangle ou en étoile. Ces bobines sont parcourues successivement par le courant triphasé émis par l'horloge-mère, et le champ tournant ainsi produit, entraîne l'aimant en fer à cheval, en le faisant tourner synchroniquement avec la partie mobile de l'horloge-mère.

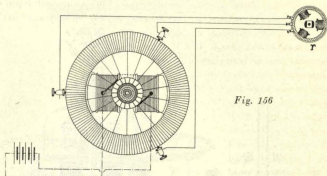


Fig. 156

On obtient un nombre de tours plus faible que celui du moteur de celle-ci, en doublant ou triplant le nombre des pôles des bobines induites.

L'horloge à moteur synchrone de Thury a été employée avec succès à la commande d'appareils scientifiques tels que les équatoriaux astronomiques, les sismographes, les chronographes-enregistreurs et autres instruments analogues en usage dans les observatoires et dans certains laboratoires. La grande puissance qu'elle est capable de développer, même avec un courant relativement faible (0,03 ampère sous 2 volts) et la régularité de sa marche ont permis de la substituer, pour ces divers services, aux horloges à échappement, dont les mouvements saccadés sont difficiles à transformer en mouvements rotatoires absolument continus et réguliers. Nous devons faire ici une réserve, en ce qui concerne les applications qui ont été faites aux instruments d'observatoires de l'échappement à lame vibrante de Hipp, dont la période est de l'ordre du cinq centièmes et même du millième de seconde, et qui assure notamment aux chronographes-enregistreurs une régularité de marche continue qui n'a pas encore été dépassée.

Horloge à moteur continu Warren, de la General Electric Company à Schenectady E. U. A. — Cette horloge, qui est basée, comme celle de Thury, sur l'emploi du moteur synchrone, a été étu-

diée à l'origine dans le but de contrôler très exactement la régularité de rotation des grands moteurs synchrones industriels. A cet effet, un petit moteur synchrone à départ automatique, dont la figure 157 donne l'aspect extérieur et dont les dimensions sont très petites (70×55×45 mm.) et la consommation en courant de $\frac{1}{4}$ watts seulement, est adapté à une horloge mécanique de précision battant la seconde ou les trois quarts de seconde. Cette horloge comprend deux trains d'horlogerie indépendants, dont l'un, très soigneusement construit et exécuté, est réglé par le pendule, et dont l'autre est mû par le petit moteur synchrone relié au grand moteur industriel à contrôler.

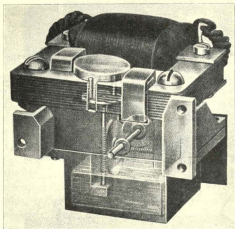


Fig. 157

Sur l'un des cadrans de l'horloge, ayant environ 130 mm. de diamètre, se meuvent concentriquement deux aiguilles à secondes, dont l'une, noire, est commandée par l'horloge mécanique de telle façon qu'elle montre le temps exact et fait une révolution en cinq minutes, et dont l'autre, qui est dorée, est commandée par le moteur synchrone. On comprend immédiatement que si les deux aiguilles se couvrent continuellement l'une l'autre, la régularité de rotation du grand moteur synchrone industriel est parfaite, et qu'au contraire, pour peu que sa fréquence moyenne avance ou retarde sur la fréquence normale qu'il doit avoir et qui est de tant par seconde, les deux aiguilles du cadran de contrôle feront entre elles, soit en avant, soit en arrière, un certain angle. Un seul coup d'œil du surveillant sur ce cadran suffira donc à lui révéler une irrégularité de marche du grand moteur et à lui montrer dans quel sens il doit intervenir pour la corriger.

L'horloge qui vient d'être décrite peut être transformée facilement en une horloge électrique indépendante. Il suffit pour cela de modifier

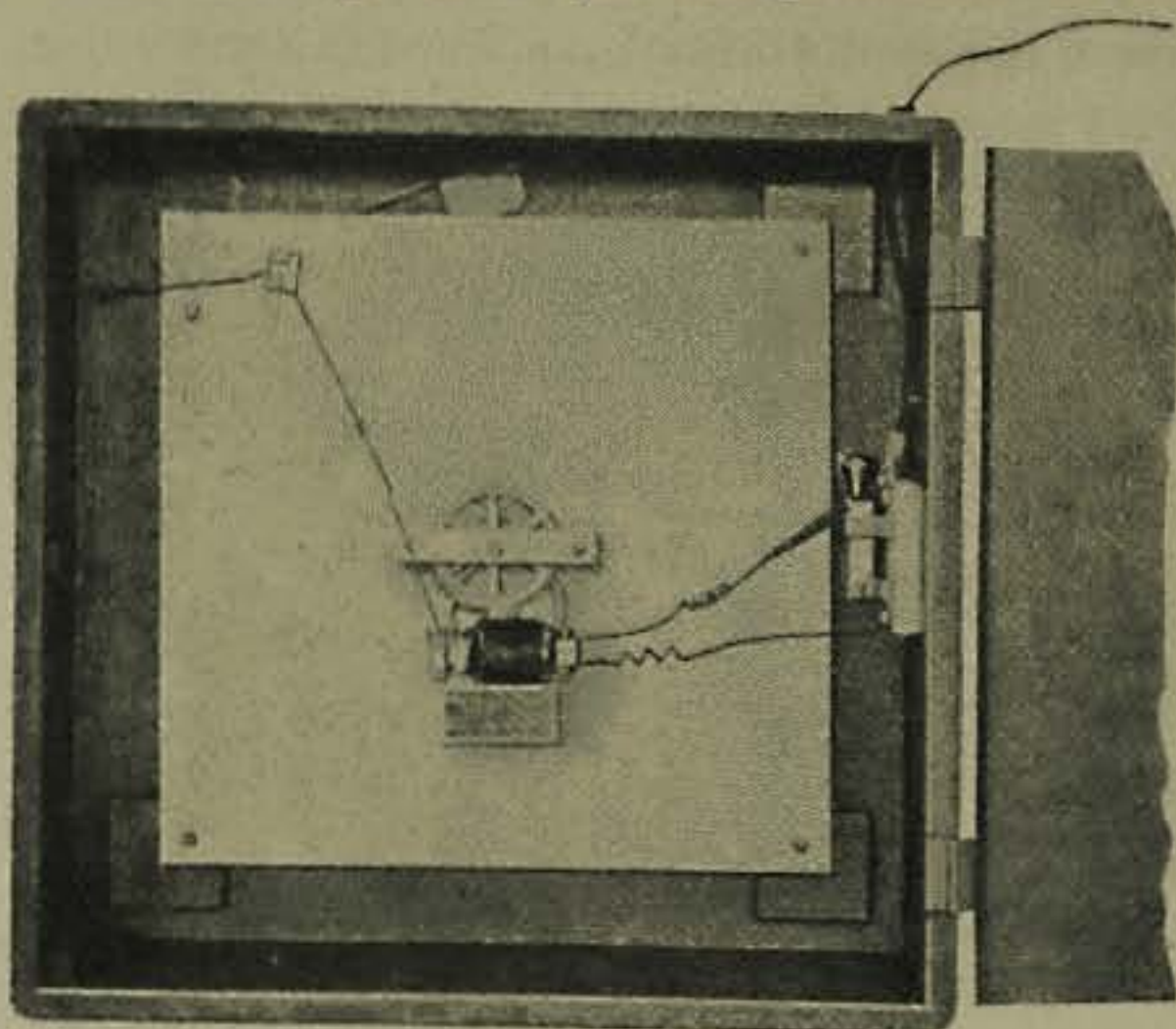


Fig. 158

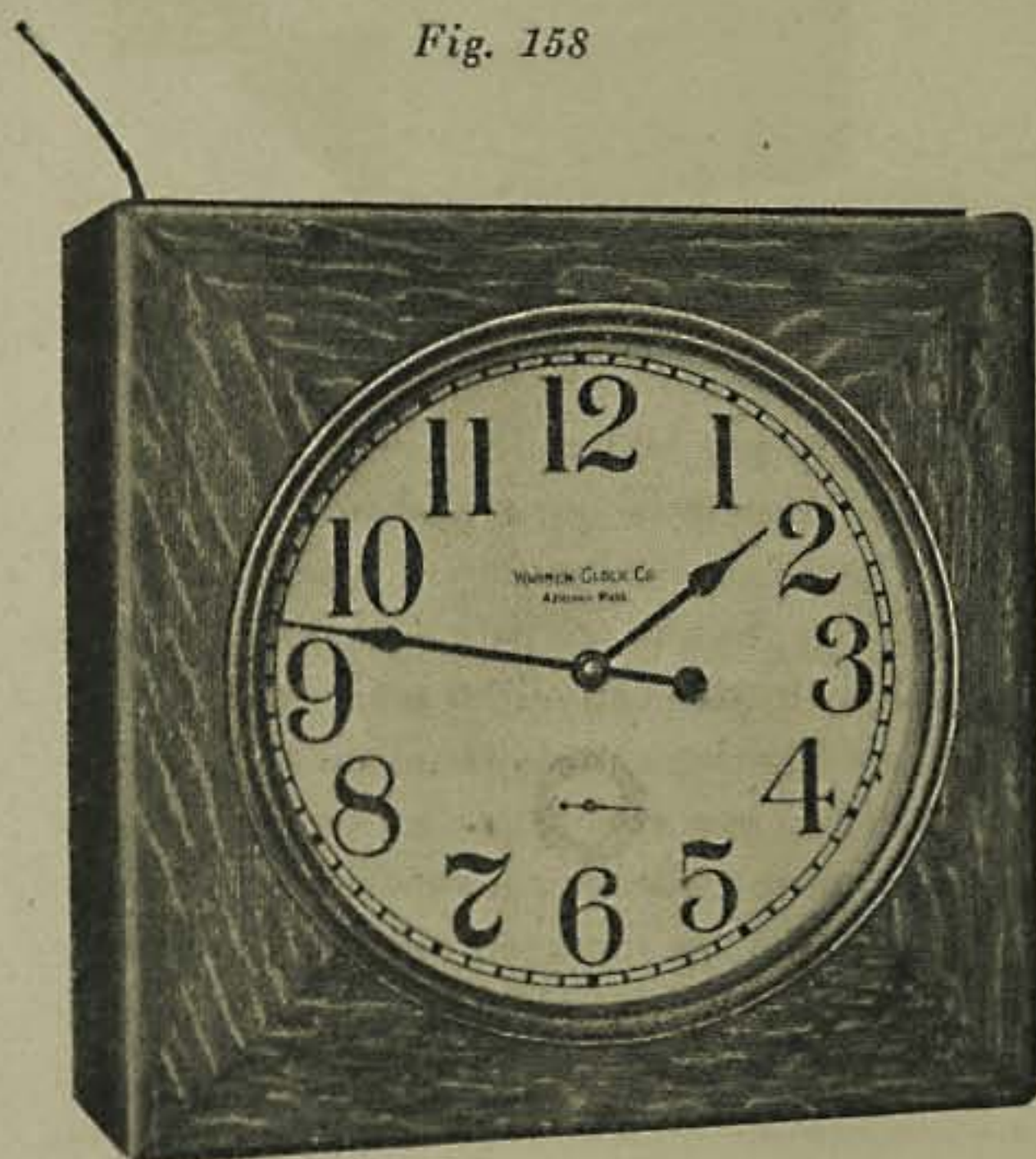


Fig. 158 bis

son mécanisme de telle façon que le mouvement de rotation continue du petit moteur synchrone soit utilisé pour remonter le poids ou bander le ressort de l'horloge proprement dite, et cette modification peut être faite à son tour de telle manière que le moteur remonte continuellement ce poids (ou ce ressort) exactement de la quantité dont l'échappement et le pendule oscillant lui permettent de se dérouler. Il résulte de là, lorsque l'horloge est à ressort, une tension uniforme de ce dernier, susceptible d'assurer une marche très régulière de cette pendule, surtout lorsque son balancier régulateur est à tige d'invar et à écrou compensateur.

L'horloge électrique de la General Electric Co. peut être employée, comme celle de Thury, à la commande d'un certain nombre d'horloges secondaires. Chacune de celles-ci est alors munie d'un petit

moteur synchrone qui est identique à celui de l'horloge-mère, et qui agit directement, au moyen d'un engrenage à vis sans fin, sur la minuterie et les aiguilles. Les figures 158 et 158bis donnent l'aspect intérieur et extérieur de l'une de ces horloges secondaires. Les mêmes petits moteurs synchrones peuvent aussi être adaptés à des instruments enregistreurs de toute espèce.

Horloges à moteurs des compteurs d'énergie électrique.

Généralités. — Nous avons déjà constaté que les horloges indépendantes à remontoir électrique avaient pris récemment une importance croissante en matière de tarification de l'énergie consommée par les abonnés de force, de lumière, etc., d'une usine centrale électrique.

Au début des installations de distribution de courant industriel, ce dernier était, en général, vendu soit à forfait, soit au compteur simple.

Dans la vente à forfait, on fixait un prix annuel unique basé sur la consommation probable, évaluée tant bien que mal à l'avance, de chaque appareil d'utilisation (lampe, moteur, etc.).

Dans la vente au compteur, qui a presque partout remplacé la vente à forfait, l'énergie électrique est mesurée et totalisée au fur et à mesure de sa consommation effective par l'abonné, et celui-ci ne paie à la fin de l'année ou du mois (ou de n'importe quelle autre période de temps convenue) que la somme correspondant à la différence des deux états du compteur totalisateur relevés au commencement et à la fin de chaque période. Le plus souvent cette totalisation s'effectue en kilowatt-heures (Partie théorique, p. 44). On a ainsi appliqué, au courant électrique, la méthode employée pour la tarification du gaz, de l'eau et autres matières analogues, distribuées au compteur totalisateur et mesurées par exemple en mètres cubes ou en litres.

Il est facile de se rendre compte dès maintenant que l'abonnement à forfait appliqué à l'énergie électrique est, dans la plupart des cas, peu rationnel : l'expérience a eu tôt fait de démontrer qu'il engendre la fraude et le gaspillage. Il n'est pas rare en effet de voir, avec ce système, de nombreuses lampes allumées en plein jour, en sorte que l'on pourrait se dispenser d'installer des interrupteurs, ceux-ci n'étant presque plus utilisés.

L'abonnement au compteur est évidemment plus rationnel que celui à forfait, puisque l'abonné ne paie que ce qu'il a réellement

consommé. Le fournisseur de courant y trouve également son compte, puisqu'il n'a à produire que de l'énergie utilement employée et dont il est assuré de recevoir le juste paiement.

Le compteur totalisateur simple, avec prix unique du kilowatt-heure pour chaque espèce d'emploi du courant, présente cependant, lorsqu'on l'examine au point de vue du fournisseur d'énergie, divers inconvénients : la courbe de débit d'une centrale varie considérablement selon le moment du jour de 24 heures auquel on la considère. En hiver, par exemple, le maximum quotidien de ce débit a lieu le soir, une heure environ après le coucher du soleil, alors qu'il y a beaucoup de lampes simultanément allumées et presque tous les moteurs industriels encore en marche dans les ateliers. Toutefois, ce maximum est généralement de courte durée et la charge de la centrale électrique tombe rapidement du fait des lampes et moteurs d'ateliers qu'on éteint et arrête à la fin de la journée de travail.

Ce maximum qu'on appelle une *pointe*, parce que, sur la courbe de débit, il se manifeste sous cette forme, oblige le fournisseur du courant à équiper sa centrale de manière à pouvoir *surmonter* en tous temps cette pointe ; ce qui revient à dire qu'il doit, à grands frais, installer des machines génératrices beaucoup plus fortes que celles qui suffiraient, si la courbe de débit, au lieu de présenter une ou plusieurs pointes, avait la forme idéale d'une droite parallèle à l'axe des *X* divisé en heures et minutes.

Le problème du *franchissement* économique des pointes a donné lieu à de nombreuses recherches et propositions dans le détail desquelles nous ne pouvons entrer ici, et qui d'ailleurs dépendent de plusieurs facteurs variant avec les conditions particulières à chaque centrale.

La tendance actuelle est non plus de franchir les pointes, mais bien de les *effacer*, autrement dit, d'organiser le système de vente de l'énergie de telle manière que la courbe de débit se rapproche le plus possible, et pour ainsi dire automatiquement, de la droite idéale de tout à l'heure parallèle à l'axe des *X*. Le meilleur moyen à employer pour arriver sûrement à ce résultat, serait de faire varier constamment le prix du kilowatt-heure vendu, en proportion directe de la *charge* de la centrale. Cela n'est point irréalisable. On pourrait, par exemple, installer chez chaque abonné, à côté du compteur contrôlant sa consommation, un appareil à cadran dont l'aiguille à indication continue donnerait à chaque instant du jour de 24 heures, l'état de charge de la centrale et, en regard de celui-ci, le prix correspondant et toujours variable du

kilowatt-heure. Ce prix, croissant et décroissant selon que l'état de charge momentanée est fort ou faible, il est évident que l'abonné s'efforcerait de n'employer le courant qu'aux instants où le prix du kilowatt-heure indiqué par son appareil à cadran, est bas. Il est clair aussi que la totalisation des efforts de l'ensemble des abonnés agissant dans le même sens, aurait pour effet d'abaisser les pointes, de combler les creux de la courbe de consommation et par conséquent de régulariser la charge des machines elles-mêmes ; celles-ci travailleraient alors dans les meilleures conditions possibles de rendement, tandis que, d'autre part, le fournisseur de courant aurait sa recette journalière de mieux en mieux assurée à un prix moyen du kilowatt-heure que l'expérience permettrait d'établir pour chaque saison. En fait, ce système travaillerait à la manière du régulateur de vitesse d'une machine motrice quelconque (à vapeur, à eau, à gaz, etc.), dont les organes ont pour but et pour effet de faire varier l'admission du fluide moteur, en fonction de la vitesse momentanément trop grande ou trop petite de la machine.

Toutefois, de même que dans ces régulateurs de vitesse, la rapidité d'action des divers organes réglants est une condition de bon fonctionnement, et que cette rapidité faisant défaut, la vitesse qu'on cherche à rendre constante est sujette à des vagues, à des fluctuations oscillant, en plus ou en moins, autour de la vitesse de régime normal, de même dans le système de vente esquissé ci-dessus, on risquerait de provoquer artificiellement des pointes inattendues situées n'importe où sur la courbe de consommation quotidienne. Ici en effet, la rapidité d'action des organes réglants, qui sont, en l'espèce, les volontés combinées des divers abonnés, pourrait être extrêmement variable, selon les circonstances agissant momentanément et probablement très différemment, sur chacune de ces volontés particulières. En outre, il y aurait pour appliquer ce système dans toute sa rigueur, des difficultés techniques à vaincre qui auraient probablement pour effet de rendre plus ou moins illusoire l'avantage économique cherché.

Une solution plus simple et plus pratique du problème qui nous occupe a été cherchée et trouvée dans l'emploi de ce qu'on appelle les *compteurs à tarif multiple*.

Au lieu de faire varier constamment le prix du kilowatt-heure en fonction de la charge de la centrale, on ne le fait varier que deux, trois, quatre, etc., fois par jour de 24 heures et cela de telle façon qu'à chaque pointe de la courbe quotidienne de débit, corresponde un prix élevé et à chaque creux, au contraire, un prix bas.

Supposons, par exemple, que cette courbe de débit soit telle que pendant la saison d'été, c'est-à-dire pendant les quatre mois de mai, juin, juillet et août, on ait une consommation *faible* de minuit à 6 heures et de midi à 13 heures (arrêt de la plupart des moteurs industriels pendant la nuit et au milieu du jour et simultanément de la majorité des lampes), une consommation *moyenne* de 6 h. à midi et de 13 h. à 20 h. et enfin une consommation *forte* de 20 h. à minuit (pointe du soir), on instituera alors trois tarifs d'été, à savoir :

douzième de tarif applicable de minuit à 6 h. et de midi à 13 h.,
sixième de tarif applicable de 6 h. à 12 h. et de 13 h. à 20 h., et
plein tarif de 20 h. à minuit.

En *hiver*, soit pendant les mois de janvier, février, novembre et décembre, où la durée de l'éclairage solaire est fortement réduite, il y aura intérêt à instituer un quatrième tarif correspondant à une consommation intermédiaire entre le sixième de tarif et le tarif plein ; on intercalera par exemple un échelon correspondant au demi-tarif, et alors on aura pour les mois d'hiver :

douzième de tarif : de minuit à 6 h. et de 12 h. à 13 h.,
sixième de tarif : de 9 h. à midi et de 13 h. à 16 h.,
demi-tarif : de 6 h. à 9 h.,
plein tarif : de 16 h. à minuit.

Enfin, au printemps et en automne (mars, avril, septembre et octobre), on aura la troisième répartition suivante :

douzième de tarif : de minuit à 6 h. et de 12 h. à 13 h.,
sixième de tarif : de 8 h. à midi et de 13 h. à 18 h.,
demi-tarif : de 6 h. à 8 h.,
plein tarif : de 18 h. à minuit,

répartition qui tient compte d'une durée d'éclairage solaire intermédiaire entre celle de l'été et celle de l'hiver.

Les chiffres des trois tableaux ci-dessus ne sont donnés qu'à titre d'exemples s'appliquant à une centrale déterminée. Il est évident qu'ils peuvent être modifiés, soit comme heures des changements de tarifs, soit comme fractions de tarifs, de manière à serrer de plus en plus près la courbe de débit quotidien et à la ramener le plus près possible de la ligne horizontale sans pointes et sans creux. On pourrait aussi dans le même but, et si certaines circonstances spéciales à une centrale donnée l'exigeaient, porter à 6, 7, etc., le nombre des tarifs.

Compteur à tarif multiple du service électrique de la Ville de Neuchâtel (Suisse). — Voici comment M. *Louis Martenet*, ingénieur de ce service, a résolu pratiquement le problème de la tarification multiple appliquée indistinctement à tous les abonnés de la centrale de Neuchâtel, tout en conservant les compteurs totalisateurs déjà en usage au moment où le nouveau système fut introduit. Ces derniers sont du système dit *compteur-moteur*, dans lequel l'organe mobile est un disque plat en aluminium qui tourne toujours dans le même sens sous l'influence d'un double champ magnétique produit par le courant alternatif urbain et dont la vitesse de rotation varie proportionnellement à la consommation que fait l'abonné de ce courant. L'axe de ce disque, qui est monté de manière à réduire à un minimum le frottement des pivots, est pourvu d'une vis sans fin qui transmet, de la manière connue, aux différents mobiles du compteur totalisateur, le mouvement rotatoire plus ou moins rapide de cet axe.

Pour produire le double champ magnétique dont on vient de parler, il est nécessaire de soumettre le disque tournant à l'influence des pôles de deux électro-aimants, dont l'un, à fil fin, est parcouru par une dérivation, très faible en intensité, du courant alternatif urbain, et dont l'autre, à gros fil, reçoit la totalité du courant consommé (variable selon le nombre des récepteurs que l'abonné met en activité ou arrête). Or la rotation du disque d'aluminium peut être arrêtée, alors même qu'un ou plusieurs de ces récepteurs sont en fonction ; il suffit pour cela de couper le courant dérivé de faible intensité qui excite l'électro-aimant à fil fin. Si l'on rétablit au contraire le courant dérivé, le disque se remet instantanément en marche et le compteur enregistre de nouveau la consommation des récepteurs restés en activité.

On comprend immédiatement qu'il est possible de provoquer automatiquement, au moyen d'une horloge appropriée, les interruptions et les fermetures du circuit à fil fin, pour arrêter ou remettre en marche le compteur des kilowatt-heures consommés. Cette horloge devra être organisée de la manière suivante :

Pendant une courte période de temps donnée, pendant une minute (60 secondes) par exemple, les fermetures du circuit à fil fin se feront respectivement :

$$\begin{array}{lcl} \text{pour le douzième de tarif, durant } \frac{60}{12} & = & 5 \text{ secondes} \\ \text{« « sixième de tarif, « } \frac{60}{6} & = & 10 \text{ «} \end{array}$$

pour le demi-tarif,	durant $\frac{60}{2} = 30$ secondes
» » tarif plein,	» $\frac{60}{1} = 60$ »

A tarif plein, il n'y a plus aucune interruption et le compteur enregistre alors la totalité des kilowatt-heures traversant en une minute l'installation de l'abonné ; à demi-tarif, il n'en enregistre que la moitié, au sixième de tarif, que le sixième, et ainsi de suite.

Lorsqu'au bout d'un mois, la centrale veut établir la facture de l'abonné, elle n'a qu'à soustraire du nombre de kilowatt-heures indiqué, à la fin de ce mois, par le numéroteur (ou les aiguilles) du compteur totalisateur, le nombre relevé au commencement du mois, et à multiplier la différence ainsi obtenue par le prix du kilowatt-heure à plein tarif, pour avoir, en espèces (francs, lires, marks, etc.), le montant dû.

Une même horloge peut commander plusieurs compteurs, ce qui est économique dans le cas où plusieurs abonnés habitent le même immeuble locatif ; elle doit alors être installée dans un endroit où elle soit accessible à tous les abonnés (corridor général, cage d'escalier, etc.).

Il est temps maintenant de donner la description de l'horloge à tarif multiple qui a été adoptée en 1921 par le service électrique de Neuchâtel.

C'est une horloge électrique indépendante avec remontoir par moteur rotatif à marche continue (p. 215). Son moteur est identique en principe à celui que nous venons de décrire à propos du compteur-moteur de chaque abonné ; il est branché de la même façon que ce dernier sur le courant alternatif urbain, avec cette différence cependant qu'ici la bobine à gros fil est supprimée et que la bobine à fil fin est constamment parcourue par un faible courant (1 watt environ) qui imprime au disque d'aluminium de l'horloge une vitesse de rotation constante, indépendante des variations de la consommation de l'abonné.

Cette vitesse constante a été fixée à 120 tours du disque par minute ; on peut la régler en déplaçant légèrement une pièce de fer qui permet ainsi de modifier l'intensité du couple magnétique agissant par asymétrie du champ sur le disque.

L'axe de ce disque est muni d'une vis sans fin engrenant avec un train d'horlogerie ; celui-ci ne transmet pas directement le mouvement du disque aux aiguilles (ou cadrans tournants) de l'horloge,

mais elle *remonte* d'une manière lente et continue un fort ressort de barillet dont le déroulement actionne un autre train d'engrenages, les mobiles de la minuterie et une roue d'échappement réglée par un petit balancier pendulaire. Le tout constitue ainsi une horloge mécanique complète remontée électriquement. Le ressort de barillet peut entretenir à lui seul le mouvement de l'horloge, alors même que le courant remonteur viendrait à manquer momentanément. La réserve de force motrice emmagasinée dans le ressort est de 48 heures, ce qui est plus que suffisant. A la reprise du remontage du ressort par le courant, la réserve de 48 heures se reconstitue automatiquement.

Les mobiles principaux de l'horloge mécanique sont, en dehors de la roue d'échappement déjà mentionnée :

a) Un axe, faisant un tour en 24 heures, qui porte un cadran divisé en heures et quarts d'heure et un disque change-tarif, à cames, dont nous reparlerons tout à l'heure ;

b) Un autre axe faisant un tour en 60 minutes et portant un cadran tournant avec lui, qui est divisé en 60 minutes ; ce même axe porte en outre une roue *R* (fig. 159) à denture de rochet. Sur les dents de *R* frottent les extrémités convenablement formées de deux cliquets *C* et *D* dont l'un, *C*, a son point de pivotement fixe en *E*, et l'autre, *D*, a le sien sur un levier *F* mobile autour du point fixe *O*. Une bascule *G* peut changer l'inclinaison du levier mobile *F* (et par conséquent la position du cliquet *D* par rapport au centre du rochet *R* et l'instant de la chute de sa tête dans l'intervalle de deux dents de *R*), selon que l'arête *b* du double plan incliné *abc* presse sur l'une ou l'autre des quatre vis réglables que porte le levier mobile *F* à son extrémité inférieure *M*.

Le disque change-tarif à cames de l'axe faisant un tour en 24 heures, se voit en *A*. Ce sont les saillies et les creux de la périphérie de ce disque qui, en pressant contre la roulette *e* solidaire de la bascule *G*, déplacent cette dernière devant les vis *M* et mettent ainsi en action tantôt l'un, tantôt l'autre des quatre tarifs en vigueur. Il va de soi que la longueur et la distribution des saillies et des creux sur la périphérie de *A* correspondent à la durée et aux instants d'action et de cessation d'action de chaque tarif. Il résulte de ce qui a été dit à page 224, qu'il y a un disque *A* spécial pour chacune des trois saisons prévues. L'axe *A* et le cadran tournant qu'il porte en avant, sont disposés de façon à permettre un changement facile des disques à cames à la fin de chaque saison. Les deux cadrans tournants, celui des minutes et celui des heures, sont placés, le premier devant le rochet *R*,

le second devant le disque à cames. Deux index fixes placés au-dessus d'eux permettent de lire à chaque instant l'heure indiquée par l'horloge ; leur mise à l'heure se fait facilement en les tournant à la main indépendamment l'un de l'autre, car ils sont ajustés à frottement dur sur leurs axes respectifs.

Voici maintenant comment s'effectuent les fermetures et les interruptions des cir-

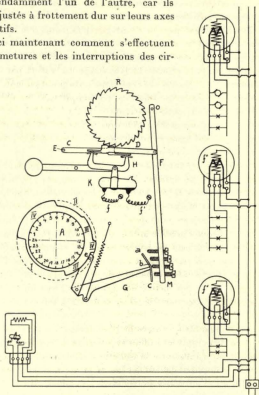


Fig. 159

cuits à fil fin de tous les compteurs totalisateurs qui dépendent d'une seule et même horloge.

Immédiatement au-dessous des cliquets *C* et *D* (fig. 159), se trouve une pièce *H* en forme de fourchette qui porte un tube de verre *K* partiellement rempli de mercure et dont les deux fils *f* et *f'* passant séparément à travers la paroi du tube, communiquent extérieurement

avec les fils fins f'' des divers compteurs (voir le schéma à droite de la fig. 159). Le contact K est *fermé* lorsque son tube est horizontal, f et f' étant reliés électriquement entre eux par la nappe mercurielle ; il est *ouvert* lorsque K , étant incliné, tout le mercure se trouve concentré à l'une des extrémités du tube et ne touche plus que l'un des deux fils ff' .

Aussi longtemps que les têtes des deux cliquets C et D , qui sont alternativement levées et abaissées par les dents du rochet R , sont placées en face l'une de l'autre (dans le même alignement), de telle manière qu'elles soient poussées *ensemble* par le revers incliné de chaque dent, puis lâchées, ensemble aussi, par leur chute simultanée dans l'entre-dents de R , le tube à mercure K conserve sa position horizontale et alors le contact ff' étant fermé, les compteurs totalisateurs enregistrent tous les kilowatt-heures passant par les installations des abonnés commandées par l'horloge.

Par contre, si, sous l'influence d'un changement de position du levier F provoqué par l'une des saillies (ou creux) du disque à cames de A , la tête du cliquet D se déplace par rapport à celle du cliquet à axe fixe C , les chutes des deux cliquets n'auront plus lieu en même temps, l'une d'elles retardera sur l'autre, et alors le tube à mercure K , grâce à l'inclinaison correspondante de la fourchette H , prendra une position inclinée (circuit des fils fins des compteurs coupé et cessation de l'enregistrement) pendant tout l'intervalle de temps qui existe entre les deux chutes. Plus cet intervalle (qui, nous le répétons, dépend exclusivement de l'inclinaison du levier F , commandée elle-même par celle des cames de A qui passe sous la roulette e) sera long, plus aussi sera longue la portion de la minute pendant laquelle les compteurs cessent d'enregistrer.

Ainsi se trouve pratiquement résolu le problème que s'était posé M. l'ingénieur Martenet.

Il y a lieu de remarquer ici que le décalage relatif des têtes des cliquets C et D peut être quelconque entre ses deux limites extrêmes (commencement et fin d'une même minute) ; on pourra dès lors aussi fixer à une fraction quelconque de cette minute la durée d'activité (et, complémentirement, de non-activité) des compteurs totalisateurs, ce qui permettra de substituer facilement aux nombres ronds du tableau des pages 225 et 226, des nombres moins ronds, contenant des fractions quelconques de la minute, et même, si on le trouve utile, des fractions de seconde. Or, ces durées quelconques réglables à, volonté au moyen des saillies plus ou moins fortes du disque à cames,

permettent elles-mêmes de fixer d'une manière quelconque aussi les prix de chaque tarif partiel. Ces prix, en effet, pour des raisons spéciales à chaque centrale, ne peuvent pas toujours être des sous-multiples ronds du tarif de base (le plus élevé).

Le tableau suivant, qui donne les tarifs actuellement en vigueur à Neuchâtel-ville où la période de base est non pas la minute de 60 secondes, comme prévu jusqu'ici, mais bien la double-minute de 120 secondes, fait bien comprendre la portée de la remarque qui vient d'être faite.

Numéros des divers tarifs	Prix correspondant du klwh. en centimes	Durée correspondante de l'activité des compteurs
1	80	120 secondes
2	40	60 "
3	14	21 "
4	6	9 "
5	3,5	5,25 "

1 est le tarif de base avec Fr. 0,80 comme prix du kilowatt-heure le plus élevé ; 2 est bien un demi-tarif exact ; par contre pour les tarifs Nos 3, 4 et 5, les prix correspondants du kilowatt-heure représentent le $\frac{1}{5,71}$, le $\frac{1}{13,33}$ et le $\frac{1}{22,85}$ du tarif de base. Ces mêmes rapports doivent, cela va de soi, exister entre le chiffre de 120 secondes (période de base) et les chiffres 60, 21,9 et 5,25 représentant en secondes les temps d'activité des compteurs.

Une autre remarque utile à faire ici, est que la marche de l'horloge à remontoir rotatif est relativement régulière, grâce au fait que le ressort de barillet est, en temps normal (c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pas d'interruption momentanée du courant alternatif urbain), toujours au même degré de tension et que par suite le balancier pendulaire, sollicité par une force motrice constante, est lui-même dans les meilleures conditions de marche. On arrive, paraît-il, à des écarts maxima de l'ordre d'une minute par mois, ce qui est pratiquement suffisant, puisque la remise à l'heure exacte des cadrans tournants a lieu à la fin de chaque mois, époque où se fait régulièrement le relevé de l'état des compteurs.

Une horloge à tarif multiple du type décrit peut commander simultanément jusqu'à 15 compteurs intercalés en dérivation.

On voit, d'après la figure 159, que chacun de ces compteurs totalise

les kilowatt-heures consommés, *réduits* dans la proportion des tarifs appliqués. Nous avons déjà expliqué à page 226 comment s'établit en monnaie la note de chaque abonné aux moments des relevés mensuels. Ce système présente un inconvénient qui existe d'ailleurs aussi, bien qu'à un moindre degré, avec le système généralement appliqué à la tarification de l'eau, du gaz, etc., et qui consiste en ceci que l'abonné (auquel la notion de l'unité «kilowatt-heure» n'est pas familière et ne représente en tout cas pas pour lui une idée aussi simple que celle des unités de volume ou de capacité employées pour l'eau et le gaz), ne connaît la dépense mensuelle qu'il a faite qu'au moment où la centrale lui fait présenter la facture correspondante.

Pour supprimer cet inconvénient, on peut ajouter à chaque compteur d'abonné un second numéroteur qui donne directement et constamment en *monnaie* la valeur des kilowatt-heures totalisés, en sorte que l'abonné peut suivre à chaque instant (chaque jour par exemple à une heure donnée) l'accroissement de sa dépense en électricité. La possibilité de ce contrôle constant par l'abonné, met la centrale à l'abri des réclamations désagréables qui surgissent trop souvent au moment de la présentation de la note, notamment lorsque celle-ci ne peut avoir lieu que tardivement. D'autre part, l'abonné apprend à mieux utiliser les instants précieux où ce sont les tarifs bas, ou tout au moins moyens, qui sont en fonction.

Nous avons donné ici une certaine extension à l'exposé d'une solution pratique du problème de la tarification rationnelle de l'énergie électrique livrée par une centrale à ses abonnés, d'abord parce que ce problème présente actuellement un grand intérêt économique et ensuite parce que la solution qui lui a été donnée à Neuchâtel met à contribution, dans une large mesure et avec ingéniosité, des organes électro-chronométriques originaux avec lesquels un horloger-électricien doit se familiariser de plus en plus. Il est bon aussi de fournir à d'autres constructeurs l'occasion de chercher et peut-être de trouver d'autres solutions du problème envisagé.

B₁. Horloges électriques indépendantes à réactions directes.

Rapide coup d'œil historique. — On doit à un Italien, Zamboni, professeur de physique à Vérone, la première pendule à réactions directes ayant fonctionné pratiquement. Cette invention remonte à l'année 1830. Ainsi que cela résulte d'une communication faite, en 1832, à la Classe d'industrie de la Société des Arts de Genève, par

le professeur de la Rive, un exemplaire de « l'horloge perpétuelle » de Zamboni fut exposé, en marche, dans la salle des séances de cet institut. Le mouvement oscillatoire de son balancier pendulaire était entretenu par les attractions et répulsions qu'exerçaient sur sa len-

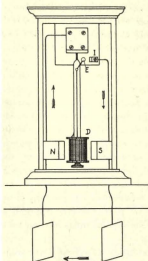


Fig. 160

tille métallique, les pôles épanouis de deux piles sèches à grande force électromotrice (piles à colonnes de Zamboni).

En 1834, Hipp, alors établi comme horloger à Saint-Gall (Suisse), conçut la première disposition de sa célèbre pendule à palette et à contre-palette, que nous décrirons plus loin ; mais il ne put la réaliser qu'en 1842 à Reutlingen (Wurtemberg).

Entre temps, Bain (1840) avait imaginé et exécuté un balancier électromagnétique, dont la masse lenticulaire était remplacée par une bobine cylindrique *D* enroulée d'un fil de cuivre isolé (fig. 160) ; l'un des bouts de ce fil était attaché à la tige même du pendule et communiquait ainsi avec la masse métallique de l'instrument ; l'autre bout remon-

trait le long de cette tige et se terminait par une petite boule de platine *E* pouvant faire, à chaque oscillation double, contact avec un point fixe *I*. Deux aimants également fixes, à pôles contraires, *N* et *S*, étaient placés de part et d'autre de la bobine *D*. Enfin la source de courant était constituée par deux plaques, l'une en zinc, l'autre en cuivre, immergées dans le sol humide avoisinant. Le circuit de *D* et des deux plaques était, chaque fois que le contact *EI* était fermé, parcouru par le courant de la pile tellurique ; ce courant transformait la bobine *D* en un solénoïde actif qui était attiré par un des pôles des aimants fixes et repoussé par l'autre, en sorte que le mouvement oscillatoire du pendule était entretenu.

Horloge à palette et à contre-palette de Hipp. — Un pendule libre (sans échappement, ni rouage, ni cadran), n'ayant d'autre résistance à vaincre que celle de l'air, peut osciller très longtemps sous l'influence d'une première impulsion ; l'intervalle entre deux impul-

sions successives pourra donc être de plusieurs secondes ou même de plusieurs minutes, ou, mieux dit, comprendre un nombre relativement grand d'oscillations de ce pendule libre, sans que la continuation du mouvement oscillatoire, ni sa régularité, en soient compromises ; à une condition cependant : c'est que le renouvellement des impulsions ait lieu, non pas après un nombre d'oscillations fixe et toujours égal à lui-même, mais bien plutôt au moment précis où, par suite des résistances s'opposant à la continuation du mouvement oscillatoire, l'amplitude de ce dernier a atteint un minimum prédéterminé.

Hipp chercha alors à résoudre ce problème, à première vue si paradoxal : faire restituer automatiquement, par le pendule libre lui-même, après un nombre x d'oscillations entières, la force vive perdue depuis l'impulsion précédente, ce nombre pouvant d'ailleurs varier légèrement par suite de l'équilibre, toujours quelque peu instable, qui existe entre la force et les résistances, sans que la régularité de marche du pendule oscillant en soit altérée. La solution, à la fois très simple et très élégante à laquelle Hipp s'arrêta, constitue l'une des inventions les plus originales et les plus importantes qui aient été réalisées dans le domaine de l'horlogerie électrique. La figure schématique 161 fait comprendre la disposition et le jeu de ce que Hipp appela : *échappement électrique*.

L'électro b à deux bobines (dont l'une couvre l'autre sur la figure) est placé exactement au-dessous du pendule, lorsque celui-ci est au repos. L'armature a , en fer doux, est fixée à l'extrémité de la tige du pendule de telle manière que sa face inférieure se trouve à une faible distance (1 mm. environ) des pôles de l'électro-aimant b .

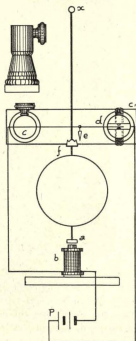


Fig. 161

L'échappement électrique est constitué par une lame d'acier plate cd , placée horizontalement à mi-hauteur du montant portant la sus-

pension x du pendule. L'une des extrémités de cette lame est pincée dans un pilier c et serrée là au moyen d'une vis à poulet ; l'autre extrémité pénètre librement dans la fente élargie d'un pilier c_1 , symétrique de c , et s'appuie, en temps ordinaire, sur la pointe en matière isolante d'une vis réglable dont la tête est visible au-dessous de c_1 ;

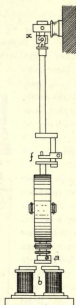
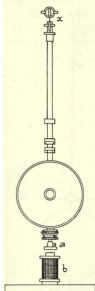


Fig. 162

une autre vis, faisant vis-à-vis à la première, présente sa pointe, garnie de platine, devant l'extrémité de la lame cd , également platinée en ce point. Vers le milieu de cd est suspendue une petite languette d'acier dur e , appelée *palette*, qui est taillée en forme de couteau et qui est très mobile autour de son axe. Le point de suspension de cette palette est un peu en dehors de la ligne verticale passant par le point de suspension x du pendule ; par contre, il se trouve dans son plan d'oscillation et c'est pour cette raison que la tige du pendule est coudée d'avant en

arrière à la hauteur de l'échappement électrique (fig. 162). Sur la partie coudée de cette tige est fixée une pièce f en acier trempé ou en pierre fine, qui est appelée *contre-palette* et qui est munie d'une (ou deux) fine entaille parallèle au couteau de la palette. La source de courant p est reliée par des fils isolés à l'électro-aimant et aux piliers isolés c et c_1 , comme l'indique la figure 161.

Voici maintenant quel est le fonctionnement de cet ensemble : le pendule ayant été écarté de la verticale jusqu'à ce que la contre-palette f ait dépassé la palette e , puis ayant été abandonné à lui-même, cette palette sera, à chaque oscillation de ce pendule, légè-

rement frôlée par la contre-palette (dont la position en hauteur est réglée en conséquence) ; mais comme l'axe de la languette est très mobile, celle-ci sera écartée, soit à droite, soit à gauche, sans que le ressort *cd* soit influencé. Au bout d'un certain temps cependant, le pendule perdant peu à peu sa force vive, et l'amplitude de son oscillation diminuant, il arrivera un instant où le retour de l'oscillation s'effectuera au moment précis où le tranchant de la palette se sera engagé dans l'entaille de la contre-palette ; il y aura alors *arc-boutement* entre ces deux pièces, et par suite soulèvement momentané de la lame *cd* ; l'extrémité platinée de celle-ci entrera en contact avec la vis supérieure du pilier isolé *c*, et fermera le circuit de la pile *p* sur l'électro-aimant *b*. Ce dernier attirera l'armature *a* et restituera ainsi au pendule qui la porte la portion de force vive qu'il avait perdue. La durée et l'instant

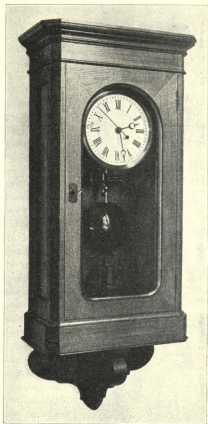


Fig. 163

de cette attraction dépendent de la quantité dont l'axe de la palette est situé à droite (ou à gauche) de la ligne verticale passant

si que l'armature a ne soit influencée, par l'aimant, que pendant la partie *descendante* de cette première impulsion automatique, le pendule recommence à osciller librement (en frôlant seulement la palette qui est très légère) ; l'impulsion suivante n'a lieu qu'au moment où le pendule atteint une seconde fois son minimum d'amplitude, et ainsi de suite. La *durée d'impulsion*, c'est-à-dire le nombre d'oscillations compté entre deux contacts électriques consécutifs, est plus ou moins grande, selon que le voltage de la pile p est plus ou moins élevé.

Grâce à cette disposition originale, la pile n'est mise à contribution que lorsque cela est réellement nécessaire. En outre la marche de la pendule est très peu influencée par les variations de l'intensité du courant ; celles-ci, qu'un enroulement à grande résistance des bobines de l'électro-aimant a réduit d'ailleurs à un minimum pratiquement négligeable, ont simplement pour effet de changer légèrement la durée d'impulsion ; quant à l'amplitude des oscillations, elle reste, en moyenne, constante, puisqu'elle ne peut pas tomber au-dessous d'une valeur minimum, toujours exactement la même à chaque contact ; enfin la restitution de la force vive du pendule se fait sans choc, lorsque les positions relatives de la palette et de la contre-palette ont été, une fois

avec le soin voulu.

& C^{te} S. A., propriétaire actuelle de l'établissement ; en 1860 par Hipp à Neuchâtel (Suisse), a

perfectionné l'échappement électrique ci-dessus décrit, de façon à assurer au contact une grande durée de fonctionnement (plusieurs années) exempte de tout nettoyage. Les pendules Hipp, qu'elle fabrique en séries, sont de deux types également robustes : chez l'un, représenté dans la figure 163, le balancier-régulateur est muni d'une tige en acier-invar (alliage acier-nickel Guillaume peu sensible aux variations de la température), et bat la demi-seconde.

Chez l'autre type (fig. 164), le pendule à tige de bois soigneusement séchée et vernie, bat la seconde.

Les deux dispositifs *mécaniques* au moyen desquels le mouvement oscillatoire des pendules électriques de Hipp est transmis à la minuterie et aux aiguilles (lorsque celles-ci sont jugées utiles, ce qui n'est pas toujours le cas), sont représentés sur les figures 165 et 166. Le premier s'applique aux pendules à demi-seconde, l'autre aux pendules à seconde.

Dans la figure 165, x est l'axe d'un levier h , muni vers la gauche d'un prolongement à angle droit : celui-ci porte un ressort plat (ou dans les types plus récents, un cliquet), qui, lorsque le levier h (entraîné par la tige du balancier au moyen d'une goupille de forme appropriée), oscille de droite à gauche, glisse sur les revers inclinés des dents du rochet r à 60 dents, qui est le premier mobile du rouage aboutissant à la minuterie et qui fait un tour en 60 secondes. Lorsque le levier h revient en sens inverse, l'extrémité droite du ressort plat s pousse celle des dents du rochet r qui est en cet instant la plus basse et fait ainsi avancer r d'une dent; h_1 est un cliquet de retient qui empêche le recul du rochet et s_1 une goupille prismatique qui, fixée au levier h , serre, par le revers, l'une des dents de r , à la fin de la course de h et empêche que r n'avance de plus d'une dent; c est un petit

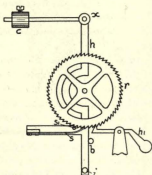


Fig. 165

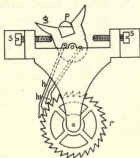


Fig. 166

contre-poids réglable assurant le contact d'une longue goupille i du levier h avec la tige du pendule oscillant, pendant tout le temps que dure le mouvement du rochet r . Enfin b est une goupille de butée du levier h qui l'arrête lorsque le pendule arrive à la verticale. L'aiguille des secondes est fixée à frottement dur sur le bout antérieur de l'axe du rochet r (devant le cadran). Ce rochet n'avance ainsi d'une dent que lorsque le pendule va de gauche à droite ; lorsque celui-ci oscille dans l'autre sens, le rochet est immobile (échappement à coup perdu).

Dans la figure 166, p est un petit prisme oscillant avec le pendule et faisant chavirer tantôt à gauche, tantôt à droite, la bascule g commandant les deux cliquets d'impulsion hh_1 . Ces cliquets poussent ainsi, à chaque oscillation, une demi-dent du rochet r à trente dents ; h pousse pendant que h_1 recule pour se placer derrière une dent et vice versa au retour, h_1 pousse pendant que h recule ; ss sont deux vis de butée qui sont réglables et qui limitent les mouvements de va-et-vient de la bascule g .

Les pendules de Hipp peuvent marcher soit avec une pile primaire de quelques volts, soit avec un petit accumulateur, soit encore avec le courant urbain d'éclairage, que celui-ci soit continu ou alternatif. Le haut voltage de ce courant urbain doit alors être affaibli en augmentant, dans la proportion voulue, la longueur d'enroulement du fil des bobines de l'électro-aimant impulseur, ou bien en intercalant, dans son circuit, une résistance passive, par exemple sous la forme d'une lampe absorbant l'excès des volts.

Pendule de haute précision de Hipp. — Pendant les années 1877-1884, Hipp modifia son échappement électrique à palette et à contre-palette de manière à pouvoir l'appliquer aux pendules d'observatoires. La figure 167 donne la vue d'ensemble d'une pendule de ce type telle qu'elle fut construite et exécutée la première fois pour l'Observatoire de Neuchâtel et telle qu'elle figura à l'Exposition internationale d'électricité de 1881, à Paris.

Elle consiste en un balancier pendulaire battant la seconde, dont le mouvement est entretenu selon le principe de Hipp, et qui, en outre, lance, à chaque oscillation, le courant d'une pile spéciale dans une ou plusieurs minuterics électromagnétiques. Celles-ci battent ainsi la seconde et peuvent être réparties dans les diverses salles de l'Observatoire. Un grand cylindre en verre, à fermetures hermétiques, enveloppe le mécanisme et le soustrait à l'influence des variations de densité de l'air atmosphérique ; on y fait, une fois pour tou-

tes, un vide partiel qui permet d'opérer un fin et dernier réglage, en enlevant ou en laissant rentrer un peu d'air dans la cloche (comparer avec p. 180).

Le balancier est à deux tiges parallèles. On a pu ainsi disposer dans un seul et même plan, celui où le pendule oscille, tous les organes mobiles (palette, contre-palette, leviers du contact à seconde) pouvant influencer défavorablement, si peu que ce soit, la régularité de marche de l'instrument, ce qui se produirait s'ils travaillaient en porte-à-faux. Ces organes sont : en haut, près de la suspension du pendule, le contact à secondes actionnant à distance les compteurs électrochronométriques ; au milieu, l'échappement électrique modifié de Hipp et l'électro-aimant impulseur avec son armature ; enfin, en bas, le vase en acier contenant le mercure compensateur des variations de la température.

La figure 168 donne, schématiquement, la disposition bien connue du contact-inverseur à secondes de Hipp. La partie oscillante de la suspension à ressorts du pendule porte, de part et d'autre, deux petites équerres métalliques bb' non isolées de la masse, munies à leurs extrémités de becs en platine iridié. Ces becs, à mesure que le pendule p oscille, touchent alternativement, à droite et à gauche, des lamelles triples l et l' , en platine iridié, qui sont montées sur les couteaux fixes (isolés) c et c' . Ces lamelles, qui sont chargées sur leurs moitiés extérieures de petits contre-poids en argent (non représentés sur la figure) abaissant leurs centres de gravité, reposent, quand elles ne sont pas soulevées par les becs oscillants b et b' , sur deux autres becs fixes a et a' (réglables en hauteur au moyen de vis de rappel convenablement disposées et non dessinées sur

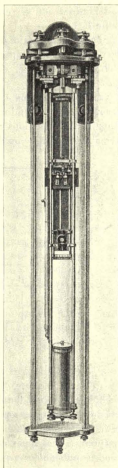


Fig. 167

notre figure). E , E' , etc., représentent les électro-aimants des compteurs. Les liaisons étant faites comme l'indique la figure, entre la source de courant B et les diverses pièces que nous venons de mentionner, on constate que lorsque le bec b' de droite touche la triple lamelle l' , celle-ci, soulevée légèrement par b' , ne touche plus a' et alors le courant de B parcourt le circuit fermé suivant :

$B^+ - a - l - c - E$ et E' en entrant par la gauche, puis $c' - l' - b'$ et enfin B^- .

Si c'est au contraire le bec b de gauche qui touche la lamelle triple l de gauche, a et l se séparent et l'on a comme circuit :

$B^+ - a' - l' - c' - E$ et E' en entrant cette fois par la droite, puis $c - l - b$ et enfin B^- .

On voit ainsi que les compteurs E , E' , etc., reçoivent à chaque seconde paire des émissions de courant positives et à chaque seconde impaire des émissions négatives ; ils peuvent ainsi être du type à armature polarisée ou du type à courants toujours de même sens ;

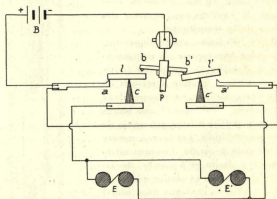


Fig. 168

l'emploi, dans ces derniers, de courants alternativement renversés est favorable, en ce sens qu'il annule les effets (collements) dus à la rémanence magnétique.

Quant à l'échappement électrique de Hipp modifié par lui pour le rendre applicable aux pendules de haute précision, il est représenté en plan dans la figure 169, en vue de face dans la figure 171 ; les figures 170 *a* et 170 *b* donnent en outre le détail des diverses positions que

peuvent prendre la palette et la contre-palette ; enfin, la figure 171 montre quelles sont les positions des leviers mobiles de l'échappement au moment précis où se produit l'arc-boutement de la contre-palette sur la palette. On constate que cette dernière, au lieu d'être *pendante*, comme c'était le cas dans le type primitif de Hipp, est ici placée *debout* sur un couteau, et qu'elle est en deux parties solidaires : la *languette* avec son tranchant tourné vers le haut, et le corps de palette

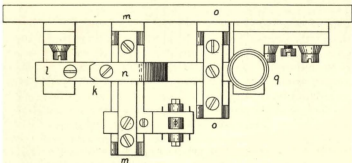
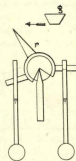


Fig. 169

qui est un petit cylindre garni à ses deux bouts d'une pierre fine à entaille triangulaire pouvant osciller sur ce couteau. Le contact proprement dit, chargé de fermer le circuit de la pile sur l'électro-aimant impulseur, se voit en *k* (fig. 171). Il entre en activité lorsque le levier porte-palette *l* oscille légèrement autour de son axe à couteau *m* sous l'effet de l'arc-boutement de la palette *r* et de la contre-palette *g* ; un second levier *n*, légèrement coudé de haut en bas (fig. 169) et portant une vis de contact *k*, peut lui-même osciller sur son axe à couteau *o* ; *p* et *q* sont des vis de butée qui soutiennent les leviers *n* et *l* (ce dernier avec l'aide du contrepoids *s*, fig. 171), lorsqu'ils sont en position de repos.

De part et d'autre du corps de palette se trouvent deux goupilles faisant entre elles un certain angle (fig. 170^a et 170^b). Suivant que la palette *r* est inclinée à droite ou à gauche, l'une ou l'autre de ces goupilles lève l'un des deux petits contrepoids (dont la forme latérale est donnée à part entre les figures 170^a et 170^b) ; celui de ces contrepoids qui n'est pas ainsi soulevé, repose par ses deux bras dans le fond d'une fente double convenablement disposée en deux endroits symétriques du levier porte-palette *l*, situés de part et d'autre du corps de palette (fig. 171).

Supposons maintenant que la palette *r* soit inclinée à droite (fig. 170^a) ; chacun des deux contrepoids repose sur le fond de la fente correspondante du levier *l* ; celui de gauche sert de butoir

Fig. 170 ^aFig. 170 ^b

d'arrêt à la goupille de gauche du corps de palette, tant qu'il n'y a pas encore contact entre la contre-palette *g* et la languette *r*. Mais la contre-palette *g* oscillant avec le pendule vers la droite, va toucher légèrement l'extrémité en couteau de la palette, ce qui forcera celle-ci à s'incliner encore un peu plus à droite et par suite

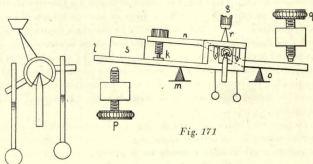


Fig. 171

à soulever le contrepoids de gauche. Au moment où la contre-palette *g*, continuant son mouvement vers la droite, aura dépassé la palette et l'aura laissé échapper, le contrepoids de gauche tombera brusquement en entraînant avec lui la goupille correspondante ; la palette sera alors forcée de se renverser en s'inclinant

à gauche et prendra la position de la figure 170^b, où c'est le contre-poids de droite qui sert de butée à la goupille correspondante du corps de palette. La contre-palette *g* oscillant ensuite de droite à gauche, viendra de nouveau toucher l'extrémité de la palette *r*, et celle-ci, échappant une seconde fois, se renversera à droite pour reprendre la position de la fig. 170^a, et ainsi de suite.

Ce jeu de la palette se répète à chaque oscillation du pendule, sans influencer la position, sur son couteau, du levier porte-palette *l*, tant et aussi longtemps que l'amplitude du pendule est assez grande pour permettre à la palette d'échapper régulièrement avant le retour de la contre-palette. Par contre, au moment précis où cette amplitude atteint la valeur-limite pour laquelle le tranchant de la palette vient s'engager dans la fine entaille de la contre-palette, il y a arc-boutement, et le retour de l'oscillation ne peut s'effectuer qu'en forçant le levier porte-palette *l* à basculer légèrement sur son couteau *m* (fig. 171), ce qui a pour effet de fermer le contact *k* et de lancer le courant de la pile dans l'électro-aimant impulseur, lequel agissant sur l'armature fixée au pendule et oscillant entre les noyaux de cet électro-aimant, lui donne (et par conséquent aussi au pendule) l'impulsion nécessaire.

Les positions relatives de la palette et de la contre-palette, aussi bien en hauteur qu'en excentricité, celles de l'armature et des pôles de l'électro-aimant impulseur, celles enfin des différentes parties du contact-inverseur de la suspension, sont toutes réglables au moyen de vis de rappel à pas fin, en sorte qu'il est aisé de trouver celles de ces positions qui assurent le meilleur fonctionnement de l'instrument aussi bien au point de vue du rendement électro-mécanique qu'à celui de l'exactitude et de la sûreté de la marche.

Les résultats obtenus par Hipp au moyen de la pendule de haute précision qui vient d'être décrite, furent des plus remarquables. Hirsch, directeur de l'Observatoire de Neuchâtel, put enregistrer, pendant de longues périodes, des variations diurnes moyennes ne dépassant pas trois centièmes de seconde. D'autre part, le jeu des contacts-interrupteurs fut tel que l'on put laisser l'instrument enfermé dans sa cloche de verre, pendant plusieurs années consécutives, sans avoir à procéder à aucun nettoyage ni de ces contacts, ni des autres organes du mécanisme. Hirsch constata en outre que des variations de 20 à 25 % dans l'intensité du courant de la pile entretenant les oscillations du pendule, étaient sans influence appréciable sur la régularité de la marche (voir la brochure intitulée :

La Pendule électrique de précision de Hipp, par le D^r Hirsch, Neuchâtel, 1889 et 1891). La variation de marche correspondant à un millimètre de changement de la pression de l'air intérieur de la cloche mesurée au manomètre à mercure de l'instrument est, pour une pendule de Hipp, de 0,012 sec. par 24 heures, soit de six millièmes de seconde inférieure à celle qu'on attribue à la pendule de Riefler (comparer avec p. 180).

Le fait, très important, que le contact à secondes adapté près de la suspension, fait de la pendule de précision de Hipp une horloge-mère capable d'actionner un certain nombre de compteurs électro-chronométriques battant la seconde et pouvant être répartis dans les différents locaux de l'observatoire, fut très apprécié des astronomes. Hirsch s'exprimait comme suit à ce sujet : « Le coup des compteurs électriques est beaucoup plus fort qu'on ne peut l'obtenir d'horloges ordinaires avec échappement à ancre, de sorte qu'on entend la seconde, même avec le plus fort vent, sans difficulté ; en outre, on peut déplacer ces compteurs suivant qu'on observe au Nord ou au Sud, de façon à avoir le cadran toujours en face, ce qui facilite beaucoup les observations. »

Il résulte des expériences de Hirsch que l'on peut résumer comme suit les progrès très importants réalisés dès 1889 par Hipp au moyen de sa remarquable pendule :

1^o Grande régularité de marche, supérieure à celle qu'on obtenait des meilleures pendules astronomiques alors connues.

2^o Suppression de tous les engrenages, pivots et lubrifiants, et en général, de tous les organes à frottements mécaniques plus ou moins variables qui affectent la plupart des autres types de pendules de précision.

3^o Possibilité de donner l'heure exacte dans tous les locaux où cela est utile, au moyen de compteurs transportables, à armatures polarisées, battant la seconde d'un coup sonore et net.

4^o L'enregistrement chronographique est assuré de la manière la plus exacte par les contacts à seconde à triples lamelles, directement, c'est-à-dire sans relais et surtout, avantage très important, sans organes rotatifs (roues dentées, leviers, etc.) interposés.

5^o Le fait que tous les organes mobiles oscillent sur des couteaux et ne nécessitent l'emploi d'aucun lubrifiant, permet de laisser la pendule de Hipp enfermée dans sa cloche de verre pendant de longues périodes (de plusieurs années), sans qu'il soit besoin de procéder à aucun nettoyage.

Aucune machine faite de main d'homme n'étant absolument parfaite, il faut, après avoir mentionné les progrès obtenus à un moment donné, indiquer ensuite les progrès encore à réaliser ; autrement dit, il faut, après la liste des avantages, présenter celle des inconvénients ou des points faibles.

Les points faibles de la pendule de précision de Hipp peuvent être rapidement énumérés comme suit :

1^o L'échappement électrique de Hipp, remarquablement simple et robuste lorsque la palette est *pendante*, devient compliqué et délicat, dès que cette palette doit être placée *debout* sur un couteau, en équilibre plus ou moins assuré par des contrepoids mobiles. Or un mécanisme délicat peut facilement donner lieu à des dérangements.

2^o Hipp persuadé, à tort selon nous, de la nécessité absolue de placer dans un même plan, celui d'oscillation du pendule, tous les organes mobiles de l'échappement électrique, admit (encore ici à tort), qu'il ne pouvait réaliser cette condition qu'en formant ce pendule de deux longues tiges parallèles en acier, reliées aux endroits voulus par quatre traverses en laiton. En procédant ainsi, il constitua un *cadre* dépourvu de la stabilité que possède un balancier pendulaire à simple tige. Ce cadre en effet présente aux huit endroits où les tiges sont serrées par les traverses, des points *critiques*, qui lors des changements de température, peuvent provoquer des torsions plus ou moins importantes du cadre, déformer celui-ci et modifier ainsi les positions relatives de la palette et de la contre-palette, ce qui a pour conséquence presque inévitable une variation plus ou moins grande de la marche de la pendule. L'expérience a démontré qu'il est très difficile de trouver deux tiges métalliques ayant exactement le même coefficient de dilatation ; dès lors on comprend facilement quelle est la cause qui peut provoquer la torsion, ou plutôt le gauchissement d'un cadre pendulaire. Les belles marches obtenues, souvent par tâtonnements successifs, avec plusieurs exemplaires des pendules de précision de Hipp, doivent être attribuées à d'heureux hasards qui ont permis d'accoupler des tiges à texture moléculaire identique ayant un coefficient de dilatation identique.

3^o Le contact à secondes de Hipp rend d'excellents services, lorsque le nombre des appareils électro-magnétiques qu'il actionne n'est pas très grand et surtout lorsqu'il est à peu près *invariable*. Mais aussitôt que ce nombre varie ou dépasse une certaine limite,

on constate des variations correspondantes dans la marche de la pendule : celle-ci change lorsque l'intensité du courant qui passe par l'interrupteur varie. Cette intensité augmente-t-elle, la pendule retarde ; diminue-t-elle, la pendule avance. Des expériences méthodiques ont permis à l'auteur de la présente étude de constater que la variation de marche diurne d'une pendule à seconde, est d'environ un dixième de seconde par milliampère intercalé ou désintercalé dans le circuit du contact à secondes de Hipp.

Il résulte de ce qui précède et de ce que nous avons déjà dit à la page 181, que ni la pendule de Riefler, ni celle de Hipp, ne peuvent, en tant qu'instruments de haute précision, satisfaire pleinement aux exigences modernes d'une exacte, automatique et indéfiniment extensible distribution de l'heure dans les observatoires. A plus forte raison ne pourraient-elles pas assurer une telle distribution dans les villes et les pays dont ces observatoires devraient constituer tout naturellement les centres horaires fondamentaux. Pour arriver à ce dernier résultat, il faudrait les compléter ou les modifier. Nous verrons plus loin, au chapitre IX, comment le problème de la distribution *universelle* de l'heure exacte se pose actuellement et quelles sont les solutions rationnelles que l'on peut dès aujourd'hui envisager avec certitude de succès.

Horloge à réaction directe de la maison Bohmeyer¹, à Halle. —

Cette horloge mérite ici une mention spéciale pour la double raison que l'électro-aimant impulseur est à armature polarisée par un aimant permanent *c* (fig. 172)

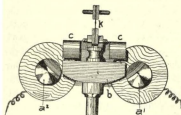


Fig. 172

et que ce système électro-magnétique est placé dans le voisinage immédiat de la suspension à ressort *k* du pendule. La disposition de l'armature *b* qui oscille avec le pendule entre les pôles *a¹* et *a²* légèrement entaillés de l'électro-aimant, est telle que pendant l'oscillation

de gauche à droite, elle est attirée par *a¹* et repoussée par *a²* et, pendant l'oscillation inverse, attirée par *a²* et repoussée par *a¹*. Les émissions alternativement renversées excitant les noyaux sont pro-

¹ Voir *Die elektrischen Uhren* von Gust. Krumm, p. 257.

duites par un contact inverseur de Hipp qui est directement actionné par le pendule et qui n'est pas représenté sur la figure.

Dans les horloges à réactions directes de Hipp et de Bohmeyer, le contact interrupteur excitant l'électro-aimant impulseur est actionné directement par le pendule lui-même, en sorte que ce dernier est maintenu en oscillation indépendamment de toute espèce de rouage.

Dans quelques-unes des horloges dont les figures et descriptions vont suivre, ce contact est ou bien actionné indirectement par l'intermédiaire d'une roue dentée, dite roue ou rochet d'échappement, qui avance d'une dent à chaque oscillation, ou bien situé à distance, à l'extérieur du mécanisme pendulaire proprement dit.

Horloge de Lemoine¹ (Paris). — Dans la figure 173, l'électro-aimant impulseur est placé, non pas directement au-dessous du balancier P et de son armature, mais bien de côté.

r_2 est une roue à dents de rochet sur laquelle P réagit à chaque oscillation au moyen d'un bras f_1 portant un cliquet d'impulsion k ; k_1 est le cliquet de retenue empêchant le recul

de r_2 . L'axe de r_2 porte un quadruple bras r_3 qui vient fermer, 4 fois par tour de r_3 , le contact c et par suite le circuit $BE L_2 c r_3 L_3 B$ dans lequel se trouvent la source de courant B et l'électro-aimant im-

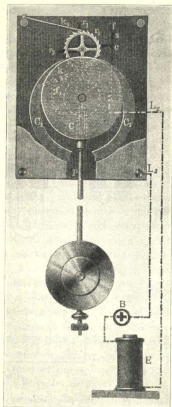


Fig. 173

¹ Voir MERLING, p. 400.

pulseur E . Celui-ci, devenu actif, attire aux bons moments l'armature oscillante et entretient le mouvement du pendule. Le rochet r_3 transmet son mouvement de rotation aux autres mobiles de l'horloge. C et C_1 sont deux disques destinés à actionner une sonnerie d'heure électromagnétique dont nous n'avons pas à nous occuper ici.

Horloges de Féry. — M. Féry, de Paris, a fait breveter diverses horloges électriques indépendantes qui rentrent dans la présente classe. Nous rappelons ici, pour éviter tout malentendu ou tout reproche

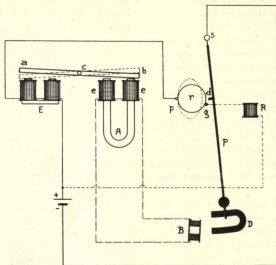


Fig. 174

d'incohérence, que par horloges à réactions directes nous entendons celles chez lesquelles c'est l'organe régulateur lui-même (pendule ou balancier) qui est directement soumis aux impulsions électromagnétiques ; cette définition reste applicable quelle que soit l'espèce de courant produisant ces impulsions (courant de pile, courant induit ordinaire, courant de Foucault, courant de charge ou de décharge d'un condensateur, etc.).

Une des premières horloges électriques de M. Féry fut appelée par lui : *Pendule à restitution électrique constante*. La figure 174 en

donne la représentation schématique. Le balancier pendulaire P dont l'axe de suspension est en S , porte à son extrémité inférieure un aimant permanent D en forme de fer à cheval. La branche inférieure de cet aimant pénètre librement dans le solénoïde fixe B , lorsque P oscille de droite à gauche. Le contact que ferme P à chaque oscillation se voit en r . Il est constitué, d'une part, par un ressort annulaire très léger fixé en p et, d'autre part, par un doigt d oscillant avec le pendule. Lorsque celui-ci a atteint sa position extrême à gauche, ce ressort prend la forme ovale représentée en pointillé. Une goupille fixe g sert d'appui et de butée au ressort lorsque le doigt d cesse de le toucher. Le contact rd n'est pas intercalé directement dans le circuit du solénoïde impulseur B . Ainsi que cela est indiqué dans la figure 174, le point d'attache p du ressort circulaire est relié par un fil qui passe par l'électro-aimant E , va à la pile et enfin à l'axe de suspension S de P .

L'armature ab de l'électro-aimant est pivotée en c et se prolonge à droite au-dessus des pôles d'un aimant permanent A munis de deux bobines accouplées e ; ce sont celles-ci qui sont reliées au solénoïde impulseur. R est une bobine (intercalée entre la goupille d'appui g et la pile), qui a pour but d'anéantir l'étincelle d'extracourant. Voici quel est le fonctionnement de cet ensemble :

Quand le pendule P oscille vers la gauche, le contact dr se ferme ; l'électro-aimant E , devenu actif du fait de la pile, attire l'armature a qui, en basculant autour de c , s'éloigne brusquement des pôles de A . De là la naissance, dans les bobines e , d'un bref courant induit qui circule dans le solénoïde B et influence à son tour l'aimant oscillant D . Si les connexions sont correctement faites, cette influence se manifeste par une attraction de B sur D . Au retour de l'oscillation, le doigt d cesse de toucher le ressort circulaire r , le courant est interrompu, E cesse d'attirer son armature ab et l'extrémité b de celle-ci vient de nouveau plaquer sur les pôles de l'aimant A ; cela a pour conséquence l'envoi dans le solénoïde B d'un second courant induit, inverse du premier, qui produit une répulsion de B sur D . Les deux impulsions agissant dans le sens même du mouvement du pendule P , entretiennent les oscillations de ce dernier et par suite aussi celles de l'armature ab . L'un ou l'autre de ces deux mouvements peut être employé soit à fermer des contacts commandant des compteurs électrochronométriques, soit à actionner mécaniquement une minuterie ordinaire avec aiguilles et cadrans.

Plus tard, M. Féry, préoccupé de diminuer l'usure de la pile trop

longtemps fermée, selon lui, par le contact *dr*, modifia son système en substituant à l'armature neutre de la figure 174 une armature polarisée, laquelle, moyennant certaines adjonctions, lui permit de rompre le circuit de la pile aussitôt après le mouvement de bascule de cette armature et de réduire à quelques centièmes de seconde la durée de sa fermeture.

Horloge de Féry sans lien matériel. — Plus tard encore, M. Féry imagina son horloge dite *sans lien matériel*, dont la figure 175 donne la disposition schématique. Celle-ci comporte deux balanciers pendulaires *P* et *P'* ayant même période et suspendus l'un à côté de l'autre. L'un d'eux, *P'*, porte un aimant permanent à deux branches

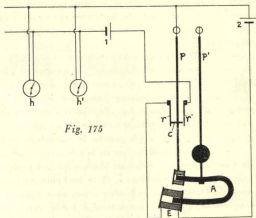


Fig. 175

A, dont l'inférieure est influencée par le solénoïde *E* ; l'autre, *P*, porte en manière de lentille, une masse tubulaire en cuivre dans laquelle peut pénétrer librement la branche supérieure de l'aimant *A*. Le balancier *P'*, mis en oscillation une première fois à la main, entraîne le balancier *P*, grâce aux courants de Foucault développés dans sa masse tubulaire, et ce dernier oscille en même temps que l'autre avec un retard d'un quart de période. Deux ressorts *r* et *r'*, disposés de part et d'autre de la tige du pendule *P*, commandent l'un avec l'aide de la pile 2, le solénoïde *E*, l'autre, par la pile 1, les horloges réceptrices *h*, *h'*, etc.

Le professeur Bouasse, dans l'ouvrage déjà cité ailleurs (*Pendule, Spiral, Diapason*, vol. II, p. 212), déclare *indéfendable* le système

« sans lien matériel » de Féry, qui n'élimine en aucune façon, écrit-il, « les causes d'erreur tenant aux contacts, toute irrégularité du pendule auxiliaire se reportant sur le principal, par le lien matériel ou non. »

Dans le cas particulier du système Féry décrit ci-dessus, le professeur Bouasse a raison. Toutefois, il faut se garder, ici, de généraliser trop et de dire que l'idée même de reporter sur un pendule auxiliaire ou secondaire les résistances (mécaniques ou autres) plus ou moins variables que ne pourrait vaincre, sans être perturbé dans sa marche, le pendule principal, que cette idée, disons-nous, est, elle aussi, *indéfectible* !

Tout dépend de la nature et de la qualité de l'intermédiaire, appelé *immatériel* par M. Féry, qui relie entre eux les deux pendules solidaires, et de la quantité de force vive que cet intermédiaire est capable de communiquer au pendule auxiliaire et d'emmagasiner en lui.

Lorsque, au lieu des courants de Foucault employés par M. Féry, on utilise, pour synchroniser à distance deux pendules, le lien, immatériel aussi, d'un courant synchronisateur emprunté à une source d'électricité extérieure, on réalise un ensemble de deux balanciers dont l'un, le directeur, peut être disposé de telle façon que, soumis à un régime électrique et mécanique *invariable*, il présente une régularité de marche comparable à celle des meilleures pendules astronomiques connues, et dont l'autre, le synchronisé, tout en restant sous la dépendance absolue de son directeur, peut être muni de contacts très sûrs et très robustes capables d'actionner, avec la coopération d'une source de courant appropriée, un nombre très grand ou même très variable d'appareils électromagnétiques secondaires quelconques, sans que soit, de ce fait, perturbée la marche excellente de la pendule directrice. Nous aurons plus loin l'occasion de revenir sur cette question importante à laquelle la théorie, aussi bien que la pratique, ont permis de donner une solution satisfaisante.

L'erreur de M. Féry a été d'admettre que la force vive contenue dans son pendule auxiliaire P est plus grande que celle contenue dans son pendule principal P' et que par conséquent P peut, plus aisément que P' , vaincre la résistance supplémentaire provenant des contacts cr et cr' . Or, c'est l'inverse qui est vrai, car la force vive contenue dans P est égale à celle contenue dans P' , *moins la perte inhérente à tout transport de force*.

Toutefois, de même qu'une force initiale relativement grande peut

être peu à peu réduite à zéro, lorsqu'on la fait passer à travers une série suffisamment longue ou suffisamment rapide, de mécanismes *transporteurs* dont les pertes successives s'ajoutent les unes aux autres, de même, ou plutôt réciproquement, une force initiale extrêmement petite peut être indéfiniment accrue, lorsqu'on la fait passer à travers une série suffisamment longue ou suffisamment rapide de mécanismes *déclancheurs*, dont chacun emprunte à un réservoir d'énergie extérieur (pesanteur, électricité, force expansive d'un gaz, etc.) la portion de cette énergie pour laquelle il a été calculé. C'est ainsi qu'on peut, par une simple pression de quelques grammes exercée sur un bouton électrique, arrêter ou mettre en marche une machine de plusieurs centaines ou même de plusieurs milliers de chevaux. C'est ainsi encore que la double détente d'une arme à feu de précision peut, lorsqu'on la frôle à peine du doigt, libérer instantanément l'énorme force de projection contenue dans la charge de la cartouche.

Ces deux séries de mécanismes à effets inverses, les transporteurs et les déclancheurs, ont pris, dans la science mécanique moderne, une importance capitale qu'il faut savoir reconnaître.

Pendules de Grégory et de Lippmann¹. — Nous avons vu que les impulsions entretenant le mouvement d'un balancier à réactions directes pouvaient être produites par des courants *induits* (*Pendule de Féry*, p. 248). L'idée même de substituer au courant d'une pile, un courant induit produit par le mouvement d'une armature d'électro-aimant, est née de la préoccupation de donner aux impulsions le plus haut degré possible de constance. On sait, en effet, que si le mouvement de l'armature est plus ou moins rapide par suite de l'intensité plus ou moins grande du courant de pile qui l'actionne, le courant induit reste néanmoins constant. Toutefois cette constance d'impulsion ne résout qu'une partie du problème qui consiste, comme on le sait aussi, à produire des impulsions aussi peu perturbatrices que possible de la *période* de l'oscillation pendulaire. Or le point de cette oscillation où l'impulsion a lieu est loin d'être indifférent. L'étude des lois du pendule a permis de poser, à ce sujet, une règle qui est fondamentale et que le professeur Bouasse formule comme suit :

« Pour ne pas modifier la période, l'échappement (ou ici l'impulsion) doit produire un choc brusque au passage par la position d'équilibre ; s'il ne réalise pas cet optimum, il doit produire deux chocs

¹ Voir BOUASSE : *Pendule, Spiral, Diapason*, vol. II, p. 240.

égaux, les plus petits possible, de part et d'autre de cette position. (*Pendule, Spiral, Diapason*, vol. I, p. 298). »

Lippmann (voir *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1896 et 1898) s'exprime de son côté de la manière suivante :

« Si deux impulsions égales sont imprimées au pendule en un même point de sa trajectoire, l'une à la montée, l'autre à la descente, les perturbations qu'elles produisent sont égales et de sens contraires. Si les impulsions ont lieu sur la verticale, l'effet produit quant à la durée de l'oscillation est nul, et il est d'autant plus accentué que le point d'application s'écarte davantage de la verticale. La perturbation totale est donc rigoureusement nulle, quand même la force impulsive n'agit pas exactement au passage du point mort. »

En résumé, on obtiendra les meilleures conditions d'entretien du mouvement oscillatoire d'une pendule électrique de précision, en réalisant l'une ou l'autre des deux dispositions suivantes :

Une seule impulsion brève au moment où le pendule passe par la verticale ;

Deux impulsions égales et constantes de part et d'autre de la verticale, symétriquement, et aussi près que possible l'une de l'autre.

S'agissant de pendules à réactions directes, la constance de deux impulsions symétriques peut être à peu près obtenue, soit au moyen de courants induits, comme nous l'avons vu, soit encore au moyen des courants de charge et de décharge d'un condensateur, comme nous allons le voir.

Dans la figure 176, qui représente la pendule que Grégory proposa

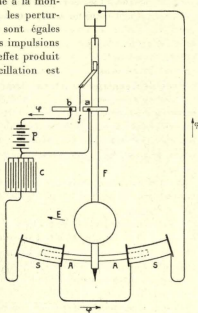


Fig. 176

en 1889 (BOUASSE : *Pendule, Spiral, Diapason*, vol. II, p. 211), le balancier pendulaire F porte, à son extrémité inférieure, un aimant AA qui oscille entre les deux solénoïdes S à actions concordantes. La pile est en P , le condensateur en C ; b et a sont deux contacts que touche alternativement le ressort f fixé à un bras de la tige du pendule oscillant. Quand f touche b , le courant de P charge le condensateur (flèche ϕ) et agit en même temps sur l'aimant AA dans le sens de la flèche E . Quand, au retour de l'oscillation, f touche a , le condensateur C se décharge en produisant un courant, de sens inverse du précédent, qui agit une seconde fois sur AA en concordance avec le sens du mouvement du pendule.

Pendule d'expériences à frein électromagnétique de Favarger.

— L'auteur du présent ouvrage, désireux d'étudier expérimentalement l'influence de la variation de certains éléments mécaniques ou électriques sur la marche d'une pendule électrique de précision, réalisa dans ce but le type d'horloge dont la figure 177 donne la disposition schématique et qui présente quelques particularités intéressantes.

B est le balancier pendulaire dont a est la tige, b la masse lenticulaire réglable en position au moyen de l'écrou divisé c , et d la suspension à ressorts.

A l'extrémité inférieure de la tige a est fixé un aimant permanent e à pôles N et S . Le pôle N , à mesure que le balancier B oscille, entre librement dans un solénoïde fixe f et en sort alternativement. C'est ce solénoïde f qui reçoit, comme il sera expliqué plus loin, les émissions de courant chargées de produire les impulsions entretenant les oscillations de B .

Près de la suspension d se trouve un contact de Hipp, tel qu'il a été décrit à page 240, et qui a pour but et pour effet d'envoyer à chaque seconde dans l'électro-aimant polarisé i d'un compteur électrochronométrique H , des émissions de courant alternativement renversées fournies par une pile h . L'armature dentée rotative k du type Favarger avance d'une demi-dent à chacune de ces émissions et bat ainsi la seconde, à distance, synchroniquement avec le balancier B ; elle fait tourner au moyen d'un pignon la roue dentée m qui porte une étoile à bras multiple et peut fermer ainsi un nombre donné de fois par minute le contact fixe o ; ce nombre dépend lui-même du nombre des bras de l'étoile ; dans la figure 177, il est de trois. Le contact o se trouve dans le circuit de la pile p , de la boîte de résistances réglables q (rhéostat), et enfin du solénoïde f . Les contacts

g et o , le sens d'enroulement du fil du solénoïde f , et la polarité de l'aimant permanent e doivent être tels que tous concourent au même résultat, qui est d'entretenir le mouvement oscillatoire de B et non pas de le contrarier.

Le rhéostat q , gradué en ohms et en multiples et sous-multiples d'ohms, permet de faire varier à volonté et avec de très fines nuances, l'intensité du courant circulant dans le solénoïde f . L'étoile à bras

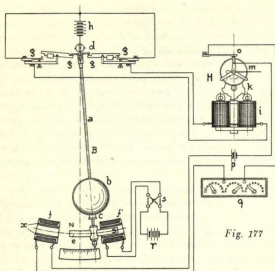


Fig. 177

multiple peut être choisie de telle façon que les impulsions aient lieu, ou bien à chaque oscillation, ou bien toutes les 2, 4, 6, 8, etc., oscillations.

Si la restitution d'énergie a lieu à intervalles rapprochés, toutes les secondes par exemple, la puissance du courant à lancer dans le solénoïde f est, pour une amplitude donnée du pendule, extrêmement petite ; elle est 2, 3, 4, etc. fois plus grande si les impulsions sont 2, 3, 4, etc. fois plus rares. Le rhéostat q permet de faire varier cette puissance et de la proportionner une fois pour toutes à la fréquence d'impulsion et à l'amplitude d'oscillation que l'on a adoptées.

Si, après avoir réalisé la combinaison de contacts électriques et

d'organes mobiles ci-dessus décrits, on étudie la marche de cet ensemble pour un régime donné du courant impulseur, on constate tout d'abord que le pendule n'oscille pas avec une amplitude constante. Cette amplitude varie périodiquement d'un certain maximum à un certain minimum (dont les valeurs peuvent être relativement éloignées l'une de l'autre), puis inversement, de ce minimum à ce maximum.

Ce phénomène, d'ailleurs connu, est la conséquence de la grande liberté dont jouit le pendule oscillant, lequel n'a à vaincre, d'une part, que la résistance de l'air, et d'autre part que celle, très faible, du contact *g*. En outre, l'impulsion se produisant à chaque oscillation (ou au bout d'un nombre entier, toujours le même, d'oscillations), ses effets successifs tendent à s'accumuler pendant un certain temps et cela jusqu'à ce qu'ait été atteinte l'amplitude de régime, celle qui correspond à la puissance d'impulsion admise. Il semble que cette amplitude de régime, une fois atteinte, devrait persister. Ce serait bien le cas, en effet, si la constance de l'impulsion et celle des résistances étaient *parfaites*, en d'autres termes, si l'équilibre entre ces deux forces était constamment assuré. Mais cet équilibre n'existe et ne peut d'ailleurs pratiquement exister qu'à un degré relatif ; il est *instable*.

Toutefois, il y a un moyen très simple de remédier à cette instabilité : c'est de munir le pendule oscillant d'un régulateur spécial ayant un rôle analogue à celui des régulateurs de vitesses des machines motrices, à vapeur, à eau, à gaz, etc., c'est-à-dire qui ait pour effet de s'opposer au mouvement du pendule lorsque celui-ci devient trop rapide (grandes amplitudes), et de lui laisser au contraire plus de liberté, lorsqu'il devient trop lent (petites amplitudes).

Or ce régulateur spécial est, dans notre cas, très facile à appliquer. Il consiste en un court tuyau de métal *x*, bon conducteur de l'électricité (cuivre, laiton, etc.) que l'on place à l'intérieur du solénoïde *f* et dans lequel le mouvement oscillatoire de l'aimant *e* provoque, comme on sait, la circulation de courants de Foucault qui s'opposent magnétiquement au mouvement de l'aimant et qui sont d'autant plus intenses et actifs que la vitesse de cet aimant est plus grande.

Ce tuyau constitue ainsi un *frein électromagnétique* très efficace qui agit comme un régulateur parfait des oscillations ; il a pour effet de rendre constante leur amplitude pour un régime donné, et par suite d'assurer la bonne marche de la pendule électrique qui en est pourvue.

Ce frein crée un frottement proportionnel à la vitesse et l'étude des lois du pendule enseigne (BOUASSE : *Pendule, Spiral, Diapason*, vol. I, p. 263 et 366) qu'un tel frottement ne modifie pas sensiblement la période du corps oscillant.

Le frein absorbe, à lui seul, une portion considérable de la force d'entretien, portion qui est d'autant plus grande qu'il est plus puissant ; il peut être utile, dans certains cas, de pouvoir régler cette puissance. On y arrive très simplement en remplaçant le tuyau-frein par un second solénoïde f' qui, placé symétriquement au premier, agit sur l'autre pôle de l'aimant e et dont le fil est fermé sur lui-même ou sur une résistance extérieure réglable.

La présence ou l'absence du tuyau-frein dans le solénoïde f a pour conséquence la nécessité de régler, dans les deux cas, la résistance du rhéostat q de telle manière que l'amplitude du mouvement pendulaire reste dans une limite convenable.

Si, par exemple, le tuyau-frein étant à sa place dans le solénoïde f , le balancier B a été réglé par l'écrou c et ensuite plus finement au moyen du rhéostat q , de telle manière que pour une amplitude de deux degrés d'arc, sa marche en 24 heures soit égale à $\pm 0,00$ sec., on pourra, sans plus toucher à l'écrou c , ni à aucune autre partie du balancier proprement dit, ni, en général, à aucun organe quelconque du système, autre que le rhéostat q , faire avancer ou retarder le balancier d'une fraction de seconde, ou même de plus d'une seconde par 24 heures, uniquement en augmentant ou en diminuant la résistance du rhéostat q .

Réciproquement, si, au bout d'une série de comparaisons quotidiennes, on constate que le balancier avance ou retarde d'une manière constante, de 0,05 sec., par exemple, en 24 heures, on pourra corriger cet écart diurne d'un seul coup, et instantanément, en intercalant ou en désintercalant au rhéostat q le nombre d'ohms qui correspond à cette marche de 0,05 sec.

Ce nombre d'ohms n'est pas le même, cela va de soi, pour deux systèmes dont les balanciers, ou la fréquence des contacts o , ou la disposition de l'électro-aimant i et de son armature k , ou la force de la pile p , etc., ne sont pas absolument identiques. Mais pour un système donné dans lequel ces divers facteurs sont invariables, on peut déterminer, à une faible fraction d'unité près, le nombre d'ohms correspondant à une variation de marche de $\pm 1,00$ en 24 heures, et en déduire par un simple calcul de proportion, celui qui correspond à une fraction de seconde quelconque. Ce nombre d'ohms produisant un

changement de marche de $\pm 1'00$ en 24 heures pourrait être appelé la *constante* de l'instrument; on le détermine une fois pour toutes expérimentalement. Dans l'instrument d'expérience, construit par l'auteur, cette constante fut trouvée égale, à peu de chose près, à 100 ohms. Il en résulte que pour amener à $\pm 0'00$ une marche constatée de $+ 0'05$ en 24 heures, il fallait *intercaler* au rhéostat $100 \times 0,05 = 5$ ohms. Quand cette marche de $0'05$ était négative (avance du balancier sur le temps exact), il fallait *désintercaler* 5 ohms.

Ceux qui savent, par expérience, combien il est difficile de corriger la marche d'une pendule de précision au moyen de l'écrou divisé ou par l'addition ou l'enlèvement de petites masses accélératrices, sans la perturber du même coup par les chocs, torsions, introductions de poussières, de courants d'air froids ou chauds, etc., qui sont la conséquence presque inévitable de cette opération, apprécieront à sa juste valeur l'avantage présenté par un système dans lequel cette correction peut se faire sans toucher au pendule et sans ouvrir le cabinet ou la cloche qui le contient.

Dans la figure 177 le solénoïde f' , placé symétriquement au solénoïde f , est utilisé comme organe de *remise à l'heure* du balancier; il a été pour cela relié avec un interrupteur inverseur s qu'on peut mettre en fonction à la main et qui lance alors dans l'enroulement de f' le courant constant d'une pile r . Ce courant, selon qu'il circule en f' dans un sens ou dans l'autre, réagit pour aider ou pour contrarier les oscillations de l'aimant e (pôle S), ce qui a pour effet de faire retarder ou avancer le balancier (dans le cas particulier qui nous occupe ici, d'une seconde par deux minutes de fonctionnement).

Comme pendule de précision pour expériences de laboratoire, cet instrument a rendu à l'auteur de précieux services. Il lui a permis, entre autres, de déterminer l'influence qu'ont, sur la marche d'une pendule munie d'un contact à lamelles de Hipp, les variations de l'intensité du courant qui passe par ce contact (comparer avec page 246). Il lui a permis aussi de mesurer exactement la partie de la force d'entretien qui est absorbée par le frein électromagnétique et par les autres résistances que le balancier pendulaire doit vaincre en régime normal.

Horloge de Féry à rochet. — Dans l'une des horloges électriques à réactions directes imaginées par M. Féry, le contact fermant et ouvrant le circuit du solénoïde impulseur est commandé par un rochet denté qui constitue le premier mobile du rouage de l'horloge.

La figure schématique 178 en donne la disposition. Lorsque le pendule *P* accomplit sa demi-oscillation de droite à gauche, le cliquet *a* fait avancer d'une dent le rochet *R* ; en même temps, une autre dent de *R* ferme pendant un court instant le contact *bc* et par suite celui du solénoïde impulseur *d*. Celui-ci réagit sur l'aimant permanent *e* fixé au bas du pendule *P*, et maintient ainsi ce dernier en oscillation.

Par contre, lorsque le pendule oscille de gauche à droite, le cliquet *a* n'exerce pas d'action sur le rochet *R* qui, grâce au cliquet de retient *f*, reste immobile (échappement à coup perdu). La vis *V* sert à régler la durée du contact *bc* et par conséquent de l'impulsion.

Horloge de la société Brillé frères. — Elle dérive de celle à rochet de Féry. La figure 179 plus loin en donne l'aspect. La forme en *C* de l'aimant a été choisie en vue d'augmenter le flux magnétique. La force contre-électromotrice développée dans le solénoïde impulseur est utilisée pour produire automatiquement le réglage de l'amplitude.

A cet effet, dit M. Béache dans l'un des intéressants articles sur l'Horlogerie électrique qu'il a publiés dans « Le Génie Civil » du deuxième semestre de 1910, « le flux magnétique de l'aimant et les spires de la bobine sont établis de telle sorte que pour

l'amplitude maximum que ne doit pas dépasser le pendule, la force contre-électromotrice, mentionnée ci-dessus, devienne égale à la force électromotrice de la pile. Pour l'amplitude maximum, il ne passerait donc plus aucun courant dans la bobine, et le pendule ne recevrait pas d'impulsion. En fait, ce dernier se réglera lui-même à une amplitude de régime légèrement inférieure. Pour celle-ci, la vitesse

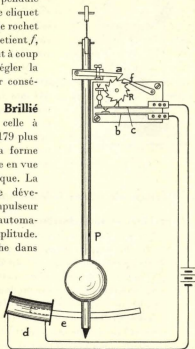


Fig. 178



Fig. 179

du pendule ayant diminué, la force contre-électromotrice aura également diminué et à chaque oscillation, il passera dans la bobine exactement la quantité de courant nécessaire pour contre-balancer les pertes dues aux résistances. Les mesures montrent que l'intensité du courant se trouve réduite à 0,1 milliampère, ce qui assure une durée indéfinie pour les contacts. »

MM. Brillé frères ont en outre réalisé des balanciers pendulaires de précision qui sont basés sur le système électromagnétique ci-dessus décrit, mais dont les contacts sont commandés directement par le pendule lui-même (done sans la coopération d'un rochet denté).

B₂. Horloges électriques indépendantes à réactions indirectes.

Généralités et sous-classification. — Ainsi que nous l'avons vu à page 169, cette catégorie d'horloges indépendantes est caractérisée par l'emploi de poids ou de ressorts qui, soulevés ou tendus par la force électromagnétique, réagissent sur le pendule ou le balancier, en retombant ou en se détendant, de manière à entretenir ses oscillations. Les impulsions sont ainsi produites mécaniquement par une force constamment égale à elle-même. Toutefois, il faut prendre ici les précautions voulues pour que l'action du poids ou du ressort sur le balancier soit exempte de chocs, de secousses ou de frottements qui, s'ils existaient, compromettraient la régularité de marche du corps oscillant et rendraient ainsi illusoire l'avantage de la constance de la force produisant les impulsions.

Le type le plus simple et aussi le plus ancien de l'horloge électrique indépendante à réactions indirectes est celui de Froment (année 1855) dont nous nous occuperons tout à l'heure. Il est basé sur l'emploi, comme force constante impulsive, d'un petit poids fixé à l'extrémité d'une légère bascule.

Depuis quelques années, divers constructeurs se sont appliqués à

employer, comme organe impulseur, non pas un poids, mais bien le ressort de suspension du pendule lui-même, que l'action électromagnétique déplace ou tend légèrement aux moments les plus favorables de l'oscillation.

Enfin, si l'on considère que dans les deux cas ci-dessus (poids soulevé ou ressort tendu), l'action électromagnétique peut être produite soit par un électro-aimant ordinaire recevant des émissions de courant toujours de même sens, soit par un électro-aimant polarisé recevant des émissions de courant alternativement renversées, on obtiendra une classification secondaire dont les quatre paragraphes suivants donnent les titres sous lettres a_0 , a_1 , b_1 et b_2 .

a₁) Horloges indépendantes à réactions indirectes dans lesquelles l'organe impulseur est un poids qu'actionne un électro-aimant ordinaire à courants toujours de même sens.

Horloge de Froment. — Immédiatement au-dessous et à gauche de son point de suspension, le pendule AB (fig. 180) porte un bec O , muni d'une vis réglable qui, lorsque le pendule oscille, soulève et abandonne alternativement un petit poids P adapté à l'extrémité d'une lame flexible PI (bascule). Le levier d'armature CD de l'électro-aimant M , dont l'axe, porté par la pièce fixe x , se trouve en I , est prolongé à gauche parallèlement à la bascule PI et se termine là en un bec recourbé sur lequel peuvent reposer l'extrémité gauche de cette bascule et son poids P , quand l'armature E de M n'est pas attirée. Mais lorsque M devient actif, il attire cette armature, enlève au poids P l'appui du bec recourbé et lui permet de peser, pendant une certaine partie de l'oscillation descendante, sur le bec O , ce qui produit l'impulsion d'entretien. Le contact, qui ferme le circuit de la pile sur M , a lieu au moment où la vis du bec O , lors de l'oscillation montante de droite à gauche, touche l'extrémité P de la bascule PI . En ce moment, il est vrai, le poids P s'oppose pendant un court instant au mouvement du pendule ; mais tôt après, c'est-à-dire au retour de l'oscillation, l'effacement du bec recourbé du levier d'armature permet au poids P de peser sur le bec O pendant un arc d'oscillation qui est plus long que celui pendant lequel, tout à l'heure, P s'opposait au mouvement du pendule montant, en sorte que, tout compte fait, le travail moteur de P sur O est plus grand que le travail résistant de ce mouvement. La bascule PI et son poids P cessent de peser sur O , à l'instant précis où elle rencontre de nouveau le bec recourbé du levier

de l'armature encore attirée ; mais, à cet instant, le contact *OP* cesse, le courant est interrompu dans *M*, l'armature *E* n'est plus attirée, et le bec recourbé de son levier *CE* relève, dans sa position initiale, la

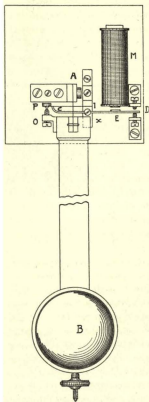


Fig. 180

bascule *PI*, en sorte que le poids *P* cesse de peser sur *O*, au moment où va commencer la partie montante de l'oscillation du pendule allant de gauche à droite ; ainsi est évité un second travail résistant.

La période complète des divers mouvements que nous venons d'analyser est égale à celle du mouvement du corps oscillant lui-même, soit deux secondes pour un balancier battant la seconde.

Divers constructeurs français, entre autres Liais et Vérité (Du MONCEL, tome IV), qui ont marché dans la même voie que Froment, ont jugé bon de doubler le mécanisme d'entretien et de donner une impulsion à chaque demi-oscillation (ou demi-période) du balancier. C'était compliquer à plaisir, et bien inutilement, un mécanisme dont la simplicité est précisément la principale qualité. Liais, très préoccupé en outre de satisfaire à la condition suivante, dont il démontra mathématiquement la nécessité : établir entre l'intensité de l'action du moteur et l'angle du pendule, une relation tendant à assurer l'isochronisme, Liais, disons-nous, en est arrivé à imaginer et à réaliser

des pendules électriques d'une telle complication que la seule inspection des dessins qui les représentent suffit à faire comprendre que l'avantage qu'on s'efforce d'obtenir à grand renfort d'électro-aimants, de leviers, de bascules, de poids, de contrepoids, de butoirs, de points de pivotements et de contacts, est positivement noyé dans

la masse des défauts de fonctionnement que tant d'organes délicats doivent nécessairement présenter au bout de peu de temps de marche. La figure 181, que nous reproduisons d'après Du Moncel et qui représente l'un des types de pendules de Liais, fera comprendre ce que nous entendons ici par pendule électrique décidément trop compliquée.

Le système de pendule électrique de Froment est, contrairement à l'opinion exprimée par le professeur Bouasse (dans *Pendule, Spiral*,

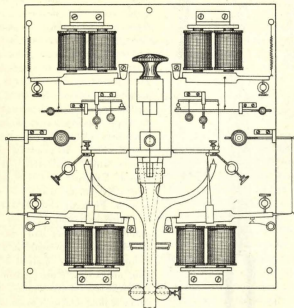


Fig. 181

Diapason, vol. II, p. 205), excellent, à condition toutefois que les emplacements relatifs des axes ou points de pivotements du balancier, de la bascule et du levier d'armature, la disposition du point d'atouchement intermittent de ces deux derniers organes, celle du contact électrique et enfin celle de l'électro-aimant et de son armature, soient combinés selon les règles les plus strictes de la mécanique et de l'électrotechnique, de manière à éviter absolument, et les frottements variables, et les collements retardateurs, et les étincelles

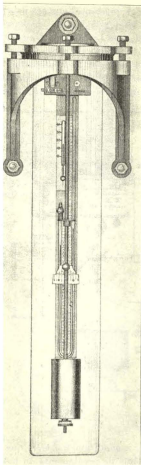


Fig. 182

d'extra-courants, et le magnétisme rémanent. Or, toutes ces conditions de bon fonctionnement sont faciles à remplir, grâce aux progrès accomplis récemment en horlogerie électrique. Appliquées avec discernement à des pendules enfermées dans une cloche de verre hermétique sous pression constante et munies d'un balancier à tige d'invar étalonnée, avec lentille à écrou compensateur, elles ont permis d'obtenir, pendant de longues périodes, des résultats de marche supérieurs à ceux des meilleures pendules astronomiques de Hipp, de Riefler et d'autres penduliers célèbres. L'écart diurne moyen obtenu de pendules électriques ainsi construites par la maison Favarger & C^{ie}, S. A., à Neuchâtel (Suisse), d'après le principe de Froment, est de l'ordre du vingt-cinq millièmes de seconde. Nous verrons dans un autre chapitre du présent ouvrage comment la même maison a résolu, au moyen d'un instrument auxiliaire très robuste auquel elle a donné le nom de *Relais pendulaire*, le problème de la distribution de l'heure exacte d'une pendule fondamentale de haute précision à un nombre quelconque, constant ou variable, de récepteurs électromagnétiques horaires de toute

èce (comparer avec p. 246). La figure 182 ci-contre donne l'aspect la pendule fondamentale Favarger & C^{ie} du type Froment perfectionné par Abegglen, avec sa cloche en verre et son manomètre à mercure.

Le nombre des horloges électriques indépendantes à réactions indirectes rentrant dans la même sous-catégorie que celle de Froment est incalculable. La seule énumération de leurs caractéristiques distinctives remplirait inutilement des pages entières de cet ouvrage. On en trouvera les descriptions détaillées dans les collections de brevets d'abord et ensuite, pour celles qui ont été réalisées avec plus ou moins de succès, dans les ouvrages spéciaux de Du Moncel, Merling, Tobler, Decressain, Zacharias, Krumm, Bouasse, etc., dans les revues d'électricité ou d'horlogerie, dans les comptes rendus d'expositions ou de congrès, etc. Citons, parmi les plus anciennes ou les plus connues, celles de Vérité, Liais, Robert-Houdin, Detouche, Garnier, Grasset, Lasseau, Gérard, Geist, Kramer, Campiche, Engelhardt, Aron, etc.

a₂) Horloges indépendantes à réactions indirectes dans lesquelles l'organe impulseur est un poids qu'actionne un électro-aimant à armature polarisée.

L'auteur du présent ouvrage a réalisé autrefois une horloge rentrant dans la sous-classe *a₂*. Elle consistait en un balancier pendulaire à tige d'invar muni d'une suspension à deux ressorts entre lesquels était disposée une petite bascule ayant pour axe un couteau fixe placé exactement sur la ligne de l'axe du balancier lui-même. Cette bascule jouait, comme organe impulseur, un rôle identique à celui de la bascule de l'horloge de Froment. Par contre, elle était relevée aux moments propices, non pas par le levier d'une armature plate ordinaire, mais bien par un doigt de forme convenable adapté à l'axe oscillant de l'armature d'un électro-aimant polarisé par un aimant permanent. Tout ce mécanisme était concentré dans le voisinage immédiat de la suspension à ressort. Un contact à secondes de Hipp fournissait les émissions alternativement renversées chargées d'exciter l'électro-aimant.

b₁) Horloges électriques indépendantes à réactions indirectes dans lesquelles l'organe impulseur est le ressort de suspension du pendule sur lequel réagit l'armature d'un électro-aimant ordinaire à émissions de courant toujours de même sens.

Horloge de Joly. — Auguste Joly, à Ligneul, fit figurer à l'exposition internationale d'électricité de 1884, à Vienne, une horloge de ce type, qui paraît être la première en date. La figure 183 en donne la

disposition, qui se comprend à première vue. La partie supérieure de la suspension à ressort du balancier est constituée par l'extrémité inférieure de l'armature *a* prolongée, à cet effet, de l'autre côté de son

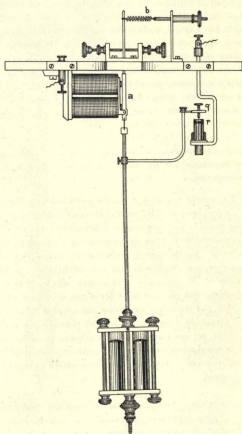


Fig. 183

axe. Le contact à godet de mercure *qr* est fermé chaque fois que le pendule oscille vers la gauche ; à ce moment l'armature *a* est attirée et plie légèrement, dans le sens du retour de l'oscillation, le ressort de

la suspension, qui en se détendant, donne une première impulsion à la tige du pendule, lorsque ce dernier va de gauche à droite. Mais à un certain moment de ce mouvement de retour, le contact *qr* s'interrompt, l'armature *a* revient en arrière sous l'influence du ressort antagoniste *b*, le ressort de suspension se tend dans l'autre sens et donne une seconde impulsion au balancier lorsqu'il oscille de droite à gauche, et ainsi de suite.

Cette disposition est très défectueuse et primitive, soit au point de vue de la suspension du pendule qui est instable et vacillante, soit à celui du contact qui est mal compris. Telle qu'elle est, elle a servi de point de départ à d'autres horloges de la même espèce, qui, mieux combinées et exécutées, ont donné de bons résultats.

Horloge Siemens-Schuckert¹. — Cette horloge est une combinaison de l'échappement électrique de Hipp à palette et contre-palette et du principe de Joly. L'échappement de Hipp ferme son contact et par suite le circuit de l'électro-aimant *m*, toutes les fois que l'amplitude du pendule a atteint l'angle minimum pour lequel se produit l'arc-boutement entre palette et contre-palette (voir la partie schématique de la fig. 184, à gauche). La partie supérieure *f* de la suspension à deux ressorts du pendule, est vissée contre une traverse en fer doux *a* qui constitue, en fait, l'armature de l'électro-aimant *m*. Cette traverse forme cadre avec deux bras *bb'*, qui se terminent par deux couteaux en acier dur oscillant sur deux gouttières en agate supportées par une pièce fixe *l*. L'axe de ces deux couteaux se confond avec celui du pendule, ou plutôt avec la

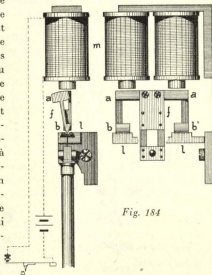


Fig. 184

¹ Voir Krumm, p. 262.

ligne idéale correspondante, qu'on admet généralement être située au tiers, à partir du haut, de la longueur libre des ressorts de suspension.

On voit immédiatement que toutes les fois que le courant est lancé dans l'électro-aimant m par le contact de Hipp, l'armature a , brusquement attirée par les deux pôles de m , tend les ressorts de suspension en les déplaçant vers la droite et produit ainsi l'impulsion d'entretien. Il va de soi que l'excentricité de la palette par rapport à la contre-palette, et par conséquent l'instant et la durée du contact d'une part, et la course de l'armature a d'autre part, doivent être réglés, une fois pour toutes, de manière à obtenir le maximum de rendement et de sûreté de fonctionnement.

b₂) Horloges électriques indépendantes à réactions indirectes, dans lesquelles l'organe impulseur est le ressort de suspension du pendule sur lequel réagit l'armature d'un électro-aimant polarisé à émissions de courant alternativement renversées.

Horloge Irk¹. — Le système du professeur A. Irk, de Vienne (Autriche), a une grande analogie avec celui de Siemens-Schuckert.

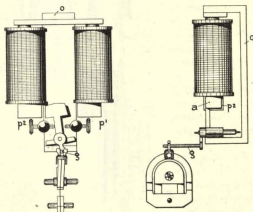


Fig. 185

Il en diffère cependant en ceci que l'électro-aimant et son armature, étant du type polarisé, entraînent la présence d'un aimant permanent

¹ Voir KRUHN, p. 263.

et la nécessité d'un contact-inverseur, du genre de celui de Hipp, que ferme le pendule à chaque demi-oscillation (soit à chaque seconde si le pendule bat la seconde). La figure 185 se comprend au premier examen : o est l'aimant permanent polarisant, d'une part les deux pôles p^1 et p^2 de l'électro-aimant et, d'autre part, l'armature oscillante a . Celle-ci, prolongée au delà de son point de pivotement, réagit, au moyen de la goupille g , sur une petite fourchette fixée à la partie médiane d'un double ressort extérieur en forme d'étrier ; ce dernier porte, en bas, une traverse et une goupille à laquelle se suspend la tige du pendule et qui constitue ainsi la partie oscillante de la suspension. Quant à la partie fixe de cette dernière, elle est également en forme d'étrier et se trouve à l'intérieur du double ressort mentionné tout à l'heure.

Ce système de suspension n'est autre que celui que Strasser, de Glashutte, a appliqué antérieurement à ses pendules mécaniques de précision et qui a d'ailleurs une grande analogie avec celui du Dr Riefler, que nous avons sommairement décrit à page 178.

D'autres constructeurs, Baumann, à Furtwangen, Cohen, à Munich, Pfeiffer, à Dresde, Ed. Schlessler, etc., ont réalisé des horloges électriques à réactions indirectes qui rentrent dans la présente catégorie b_2 . Ne pouvant les décrire toutes en détail, nous nous bornerons à donner les caractéristiques qui les distinguent de celle décrite ci-dessus.

Baumann emploie, au lieu d'un électro-aimant en forme de fer à cheval polarisé par un seul aimant permanent, deux électros qui ont chacun une seule bobine et dont les pôles se font vis-à-vis ; à chacune de ces bobines correspond un aimant permanent ; l'armature oscillante s'applique, selon le sens du courant, tantôt à droite, tantôt à gauche, contre l'un ou l'autre des pôles de chacun des électros. La figure 186 donne une idée suffisante de ce mécanisme et du contact-inverseur qui l'actionne.

Dans l'horloge de Cohen, l'électro-aimant est en fer à cheval ; il est polarisé par un seul aimant permanent ; l'armature oscillante a la forme d'une bascule dont les deux extrémités taillées en coins triangulaires correspondent à des creusures de même forme ménagées sur les extrémités polaires de l'électro. Le contact-inverseur est actionné par l'armature à bascule, et non pas par le pendule lui-même ; les impulsions d'entretien ont lieu à chaque demi-oscillation par l'intermédiaire d'une languette relativement longue qui réagit sur la suspension à ressort du balancier, dont la disposition est d'ailleurs analogue à celle du double étrier de Strasser.

L'horloge de Pfeiffer ne se distingue essentiellement des autres mécanismes de la classe b_2 que par l'emploi de *cellules* dites de *polarisation* (Polarisationszellen) qui, intercalées en dérivation sur le contact à protéger, sont destinées à éviter les étincelles d'extra-courant et dont on trouvera au chapitre III la mention et l'explication.

Enfin l'horloge de Schlessler, dont le mécanisme impulseur est pres-

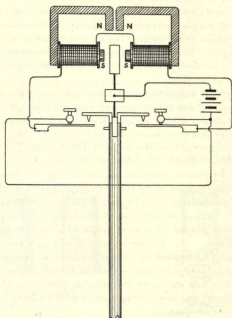


Fig. 186

que identique à celui du prof. Irk, a ceci de particulier que l'électro-aimant, au lieu d'être actionné par un contact-inverseur mis mécaniquement en jeu, est commandé par une cellule de sélénium que le pendule, en oscillant, soumet et soustrait alternativement à l'influence d'un faisceau lumineux qu'une lentille, convenablement disposée à l'entrée de la chambre noire contenant la cellule, dirige ou non sur celle-ci. On sait que, dans l'obscurité, le sélénium possède une très

haute résistance électrique, tandis qu'éclairé, il en perd instantanément une grande partie. De là dans le circuit où une cellule de sélénium est intercalée en même temps qu'une source de courant et un appareil d'utilisation (ici l'électro-aimant d'entretien du mouvement pendulaire), des augmentations et des diminutions subites d'intensité de courant qui peuvent, en fin de compte, jouer le rôle ordinairement dévolu à un contact fermé et ouvert mécaniquement. Ces variations d'intensité ne sont cependant pas assez fortes pour actionner directement un électro-aimant ayant à accomplir, au moyen de son armature, un travail mécanique d'une certaine importance; on est obligé alors de recourir à la coopération d'un relais sensible interposé entre le circuit de la cellule, d'une part, et celui de l'électro-aimant, d'autre part. En l'absence de la lumière du jour, c'est une lampe électrique qui, agissant sur une seconde cellule de sélénium, substitue automatiquement et aux moments voulus, son action à celle de la lumière solaire.

La description détaillée de la pendule au sélénium de Schlesser a été faite par l'ingénieur Johannes Zacharias dans la seconde édition qu'il a donnée en 1909 de l'ouvrage du Dr A. Tobler sur les *Horloges électriques* (Vienne et Leipzig, Hartleben).

Le lecteur ne sera pas surpris si l'auteur, en sa double qualité de théoricien et de praticien, déplore ici le gaspillage de temps et d'ingéniosité que représente l'élaboration de systèmes aussi inutilement compliqués et coûteux que celui de Schlesser. On s'oublie parfois à méditer les remarques, souvent justes, quelquefois erronées, dont le professeur Bouasse, de Toulouse, émaille humoristiquement les volumes de sa riche et remarquable *Bibliothèque scientifique de l'ingénieur et du physicien*. A la page 202 de son *Pendule, Spiral, Diapason*, vol. II, l'honorable professeur s'exprime comme suit au sujet des horloges électriques :

« On ne saurait croire l'ingéniosité dépensée et le nombre de brevets pris pour le seul but d'éviter que nous ayons à remonter nos pendules ; il est vrai qu'on nous force à entretenir des piles et à compliquer le mécanisme. C'est une très curieuse aberration économique dont je laisserais les résultats dans l'oubli, si les éléments de ces machines n'avaient pas un intérêt propre. »¹

Bien que cette boutade n'ait absolument pas sa raison d'être, lorsqu'on généralise au point de prononcer l'anathème contre tout ce qui

¹ *Le but fût-il manqué, l'effort resterait beau*, est une idée qui peut avoir de la valeur en poésie ou en philosophie, mais qu'on s'étonne de rencontrer sous la plume d'un physicien ou d'un ingénieur !

tient, de près ou de loin, au vaste et magnifique domaine de l'horlogerie électrique, si méconnu par Bouasse, elle s'applique par contre fort bien à des tentatives semblables à celle de Schlessler, tentatives qui mettent en relief la disproportion qui peut parfois exister, dans certaines œuvres trop savantes, entre la médiocrité du progrès plus ou moins réalisé et l'admirable ingéniosité des moyens mis en œuvre pour l'obtenir.

Systèmes d'unification de l'heure par l'électricité.

1^o Introduction.

La principale application de l'électricité à l'horlogerie est celle qui a pour but d'unifier l'heure indiquée par les diverses horloges d'un même établissement, d'une même ville ou d'une même contrée. L'importance attachée à la solution d'un pareil problème, est en raison directe de l'énorme accroissement de valeur que le temps a pris dans notre siècle de communications instantanées et de transports rapides. Connaître à chaque instant l'heure exacte est devenu aujourd'hui un besoin dont la satisfaction n'est possible qu'à la condition de trouver cette heure uniforme et vraie dans tous les endroits où s'exerce l'activité humaine ; celle-ci, en effet, ne peut se déployer avec toute l'utilité qu'elle comporte qu'en tant qu'elle est rigoureusement soumise à l'influence continue de ce grand régulateur qu'on appelle la notion du temps. Gares de chemins de fer, postes, télégraphes, ports, places d'aviation, garages d'automobiles, bureaux d'administration et de commerce, hôtels, écoles, hôpitaux, fabriques, usines électriques, établissements agricoles, salles de réunion et de fête, et surtout rues, carrefours et places publiques, — il n'est pas un de ces endroits qui, dès maintenant et bien davantage encore à l'avenir, ne puisse et ne doive tôt ou tard être pourvu des cadrans grands ou petits, sur lesquels passants, travailleurs ou oisifs, soient en état de suivre la marche du temps ; non pas ce temps d'autrefois, dont nos aïeux, gens peu pressés, aimaient les allures vagues et indéterminées et dont l'inexorabilité était singulièrement atténuée par la mesure fantaisiste qu'ils en faisaient, mais le temps moderne, précis comme le saut d'une aiguille à secondes, régulier comme les vibrations du diapason, uniforme comme le mouvement de la terre.

Outre les services considérables et toujours plus appréciés que l'on peut attendre de l'unification de l'heure dans tous les domaines de la

vie civile ordinaire, il est bon de mentionner ceux, très précieux aussi, qu'elle peut rendre dans les observatoires astronomiques et météorologiques, dans les laboratoires de recherches scientifiques et techniques, dans les ateliers de réglage des montres et des chronomètres transportables et enfin dans certaines fabriques spéciales où le temps doit pouvoir être mesuré, perçu ou enregistré à une seconde ou même à une petite fraction de seconde près.

L'instantanéité d'action de l'électricité a fait, de cette force, la seule capable de synchroniser, avec l'exactitude voulue, la marche d'un nombre indéfiniment extensible d'appareils horaires. Les obstacles auxquels sont venus, à l'origine, se heurter les théoriciens et praticiens à la recherche d'une solution satisfaisante du problème qui nous occupe, ont été assez nombreux et, en apparence, assez insurmontables, pour décourager la plupart d'entre eux. La difficulté n'était pas seulement de se servir de l'électricité pour uniformiser l'heure montrée par plusieurs cadrans ; ce problème, quoique déjà ardu en lui-même, fut, dès le début, abordé avec un certain succès ; le point délicat, celui qui mit à une rude épreuve la patience des chercheurs, était de soustraire les mécanismes des cadrans publics aux influences perturbatrices du milieu dans lequel il s'agissait de les faire marcher : la pluie, la poussière, la rouille, les changements plus ou moins brusques de température, les courants d'électricité atmosphérique, l'influence de fils voisins transportant les courants de force et de lumière, etc., tels étaient ici les principaux ennemis à combattre et à dompter. On remarquera d'ailleurs que la plupart de ces causes de perturbation affectent également les horloges publiques purement mécaniques ; toutefois, si leur influence devint surtout apparente à l'époque où l'on chercha à appliquer l'électricité aux horloges publiques, c'est que le nombre des cadrans exposés aux intempéries était jusqu'alors trop restreint, et l'exactitude que l'on attendait d'eux trop minime, pour que l'on eût l'occasion de s'en préoccuper sérieusement. L'horlogerie électrique, qui eut surtout comme objectif la distribution *publique* de l'heure, eut au contraire immédiatement à compter avec elles, et c'est à cette circonstance, accessoire à première vue, qu'il faut, selon nous, attribuer le peu de succès des premiers essais faits dans cette direction.

Aujourd'hui, les progrès de cette branche des applications de l'électricité et les résultats d'expériences décisives et de longue durée actuellement acquis, sont assez grands pour que l'on puisse hardiment poser en principe qu'un cadran électrique public bien combiné

et bien exécuté peut, en plein air, fonctionner avec une sûreté *beaucoup plus grande* que celle d'une horloge mécanique¹.

On peut donc considérer comme résolu dans toutes ses parties le problème qui fait l'objet de la présente étude. Il existe des installations où des milliers d'appareils horaires, unifiés électriquement, fonctionnent avec la plus grande régularité. Les résultats techniques et financiers obtenus jusqu'ici sont assez décisifs pour que l'on puisse affirmer que la cause de l'horlogerie électrique est actuellement gagnée.

2^o Organes fondamentaux de tout système d'unification électrique de l'heure.

Avant de décrire les différents systèmes d'unification qui ont été proposés et dont nous avons donné au chapitre I^{er} la classification générale, nous consacrerons quelques instants à l'étude analytique des organes fondamentaux qui se retrouvent nécessairement dans n'importe quelle installation électrique de distribution d'heure.

Nous savons que les trois éléments essentiels de toute installation électrique sont : le *générateur*, le *conducteur* et le *récepteur* du courant. Comme nous avons surtout affaire, en horlogerie électrique, à des courants agissant non pas d'une manière continue, mais par intermittences régulières, nous avons à introduire ici un quatrième facteur, l'*interrupteur* automatique, chargé de régler la fréquence et la durée des émissions de ce courant. Examinons à quelles conditions générales doit satisfaire chacun de ces quatre organes.

Générateur (source de courant). — Nous ne reviendrons pas ici sur ce qui a été dit dans la première partie de ce travail au sujet des piles primaires et secondaires. Bornons-nous à constater que si, d'une part, l'emploi des premières tend à diminuer et n'entre plus guère en ligne de compte que lorsqu'il s'agit de réseaux horaires de petite et moyenne importance, d'autre part, celui des secondes (accumulateurs) se répand de plus en plus et tend à se substituer à celui des piles primaires, dès que le nombre des cadrans unifiés dé-

¹ Nous pouvons citer, à l'appui de cette assertion, l'exemple de milliers de compteurs électrochronométriques publics qui, pendant de longues périodes de temps (10, 15, 30 et même 40 et 50 années selon leur exposition plus ou moins favorable), ont marché sans interruption. Lorsqu'au bout de l'une de ces périodes, un nettoyage devient absolument nécessaire, on constate, sur les mécanismes, la présence d'une couche de poussière et de toiles d'araignées dont la dixième partie suffirait à immobiliser complètement l'échappement à ancre ou à chevilles le mieux construit.

passer une certaine limite et surtout dès qu'il s'agit de réseaux publics de distribution d'heure.

Ce sont les piles du type *Leclanché* qui sont le plus utilisées dans les réseaux restreints, là surtout où l'on a pris des précautions spéciales pour limiter la dépense du courant, en diminuant l'intensité ou la durée des émissions (autant du moins qu'on peut le faire sans compromettre la sûreté de marche des récepteurs horaires).

Lorsque, dans une centrale horaire, ce sont des accumulateurs qui sont utilisés comme source de courant, on emploie avec succès pour les charger automatiquement sur place au moyen des courants industriels urbains de force ou de lumière, divers appareils accessoires tels que tableaux de charge avec ou sans redresseurs de courant, commutateurs automatiques de batteries principale ou de réserve, voltmètres et ampèremètres de contrôle, groupes rotatifs transformant le courant alternatif en courant continu, etc., appareils dont nous avons déjà dit quelques mots précédemment et avec lesquels nous aurons encore l'occasion de nous familiariser, au fur et à mesure de l'avancement de ce travail.

Enfin, mentionnons le fait intéressant que dans un système spécial qui est connu aujourd'hui sous le nom de *Magneta* et dont les premiers inventeurs furent deux Russes de Kiew, MM. Prokhoroff et Fahlberg (1890), les mécanismes électromagnétiques des cadrans secondaires sont alimentés au moyen de courants induits engendrés *mécaniquement* par l'horloge-mère elle-même.

Nous reviendrons plus loin sur ce système.

Fils conducteurs. — Il existe, en principe, deux manières de relier un contact-interrupteur d'horloge-mère avec les horloges secondaires plus ou moins nombreuses qu'il commande; ce sont : 1^o le mode d'intercalation en *parallèle* ou en *dérivation* que représente la figure 187, et 2^o le mode d'intercalation en *série* ou en *tension* illustré par la figure 188.

Dans le premier mode, le courant se partage, après l'interrupteur, en autant de branches qu'il y a d'électro-aimants *d*, *d'*, *d''*... pour réceptrices, et alors on travaille, comme on dit, à *voltage constant* et à *intensité variable*; ce qui signifie que l'intensité du courant débité par la source *a* croît ou diminue proportionnellement au nombre des réceptrices intercalées ou désintercalées, les volts mesurés aux bornes de cette source restant constants (on fait abstraction ici des pertes de charges des fils individuels aboutissant aux électro-aimants des réceptrices).

Dans le second mode d'intercalation, les électro-aimants $d, d', d'' \dots$ des horloges secondaires sont placés, les uns à la suite des autres, sur un seul et même fil exempt de toute bifurcation, en sorte que le courant de la source a les parcourt successivement ; on travaille alors à *intensité constante* et à *voltage variable* ; autrement dit, c'est, ici le voltage du courant débité par la source qui doit augmenter ou diminuer proportionnellement au nombre des réceptrices intercalées ou désintercalées, l'intensité du courant restant constante quel que soit le point du circuit unique où on la mesure.

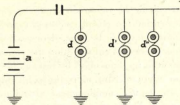


Fig. 187

Chacun de ces deux modes d'intercalation a ses partisans et ses adversaires. La lutte entre eux n'est pas encore terminée, sujette qu'elle est à des fluctuations, à des retours offensifs et défensifs. On constate cependant que dans le domaine spécial de la distribution de la lumière électrique par incandescence, c'est le système en dérivation qui est resté presque partout vainqueur ; notre conviction personnelle est qu'il en sera de même dans celui de la distribution de l'heure. Voici d'ailleurs, rapidement énumérés, les avantages et les défauts de chacune des deux méthodes :

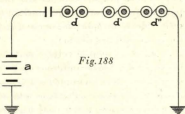


Fig. 188

I. Intercalation en dérivation.

A. Inconvénients.

Lorsque le fil principal a une section uniforme sur toute sa longueur et lorsque les électro-aimants des réceptrices ont tous la même résistance électrique, l'horloge secondaire la plus rapprochée de l'horlogemère reçoit une intensité de courant plus grande que celle qui en est la plus éloignée. Si la valeur de cet écart dépasse la limite que peut supporter, sans broncher, le mécanisme, il y a perturbation de l'une

ou de l'autre des deux réceptrices extrêmes et quelquefois aussi des réceptrices intermédiaires.

On peut remédier à cet inconvénient de trois manières différentes :

1^o en intercalant en tension dans la dérivation de chaque horloge (ou éventuellement de chaque groupe d'horloges réunies dans un seul et même bâtiment ou local), une résistance dite *d'équilibre* dont on calcule la valeur en tenant compte de la situation de chaque dérivation (ou réceptrice, ou groupe de réceptrices), de la résistance kilométrique de la ligne, de celle des réceptrices supposée la même pour toutes, et enfin des lois des courants dérivés (p. 33). Ce remède, qui était appliqué dans les réseaux horaires publics établis il y a quelque cinquante ans, alors que les fils employés étaient en fer ou en acier, a été depuis complètement abandonné, comme très incommode et comme absorbant inutilement des quantités appréciables de courant ;

2^o en donnant au fil principal du circuit et aux fils des dérivations, des sections proportionnelles aux intensités des courants totaux ou partiels qui les traversent, ainsi qu'on le fait dans les distributions de lumière électrique par lampes à incandescence ; ce moyen toutefois est coûteux d'installation ;

3^o en choisissant le voltage de la source de courant (et par conséquent la résistance uniforme de l'électro-aimant de chaque réceptrice), assez élevé pour que les différences d'intensités du courant reçu par les horloges secondaires les plus éloignées et les plus rapprochées du centre horaire, deviennent *négligeables* et soient en tous cas bien inférieures à l'écart maximum de ces intensités que peut supporter, sans être perturbée, une quelconque des réceptrices, même à l'état sale. C'est la bonne solution ; elle supprime toute résistance passive et tout appareil de réglage ; elle permet l'emploi, en n'importe quel point du réseau, de fils de section faible et uniforme ; elle a pour effet d'augmenter le rendement électro-mécanique de chaque réceptrice par une meilleure utilisation des ampères-tours de son électro-aimant et de diminuer l'intensité du courant total auquel l'interrupteur doit livrer passage.

B. Avantages.

L'indépendance des réceptrices entre elles est complète, ce qui facilite singulièrement l'adjonction et l'enlèvement d'horloges secondaires en n'importe quel point du réseau, ces deux opérations pouvant se faire en tout temps sans troubler la marche correcte des réceptrices qui restent ou sont déjà en fonction.

La rupture du fil d'électro-aimant d'une réceptrice n'arrête que celle-ci.

On peut faire varier le nombre des réceptrices attelées sur un fil principal de groupe, sans avoir à faire varier proportionnellement le nombre des éléments de la source de courant, puisque le voltage de cette source reste constant. D'autre part, celle-ci fait face *automatiquement* aux variations de débit provoquées par l'augmentation ou la diminution du nombre des réceptrices.

II. Intercalation en série.

A. Inconvénients.

L'enlèvement d'une réceptrice, ou la rupture de son fil d'électro-aimant, interrompt le circuit de toutes les autres réceptrices attelées sur le même fil de ligne. *Remède à appliquer* : mettre en dérivation sur les bornes de chaque réceptrice, une résistance ohmique qui assure le passage du courant même en l'absence du circuit de la réceptrice.

La variation du nombre des réceptrices entraîne après elle une variation correspondante du voltage de la source de courant, en sorte que celle-ci doit être remaniée chaque fois que l'on enlève ou ajoute des horloges secondaires. *Remède éventuel* : installation sur chaque circuit-série d'un régulateur automatique de tension.

B. Avantages.

Le fil principal du circuit-série peut être choisi à section uniforme et relativement faible, ce qui peut procurer une certaine économie dans les frais d'installation.

Nota. — Dans ce qui précède, nous avons eu surtout en vue des réceptrices ayant toutes la même résistance d'électro-aimant, adaptée à un réseau horaire donné. Nous n'avons en outre considéré que les deux modes d'intercalation extrêmes : dérivation pure ou série pure. Il va de soi que, même dans le cas du système en dérivation pure, on peut adopter pour certaines horloges secondaires à grands diamètres de cadrans, une autre résistance d'enroulement que celle adoptée pour les mécanismes des cadrans plus petits ; on a ainsi la possibilité de faire varier la force du courant reçu par telle

ou telle réceptrice donnée, en fonction même du travail mécanique plus ou moins grand qu'elle a à accomplir. On peut aussi, selon les circonstances, combiner les deux modes d'intercalation dans un même réseau horaire ; mettre, par exemple, dans une seule et même dérivation très rapprochée de l'horloge-mère, deux (ou plus) réceptrices en série, ce qui a pour résultat de refouler vers les réceptrices plus éloignées et à leur avantage, une plus grande partie de la force disponible. Toutefois, dans la pratique, on préfère généralement avoir un seul type d'enroulement ohmique applicable à toutes les grandeurs de cadrans et obtenir par un échelonnement méthodique des *dimensions* des électro-mécanismes, les variations de force mécanique correspondant aux variations de longueur et de masse des aiguilles à mouvoir.

Récepteurs. — L'organe fondamental de tout récepteur horaire est l'*électro-aimant* chargé de transformer en mouvement la force électrique du courant. Il est inutile d'insister sur les avantages que présentent, pour la meilleure utilisation du courant, les électro-aimants bien combinés. Mais que faut-il entendre par électro-aimant bien combiné en matière d'horlogerie électrique ? Telle est la question essentielle que beaucoup d'inventeurs ont négligée. La réponse à y faire diffère quelque peu selon qu'il s'agit de l'un ou de l'autre des divers systèmes d'horloges secondaires en présence, autrement dit, selon que les émissions de courant venant de l'horloge-mère agissent comme motrices, déclancheuses ou correctrices (ch. I^{er}, p. 169 et 170). Toutefois, comme cette réponse acquiert son maximum d'importance dans le cas du premier système, celui des compteurs électro-chronométriques, soit parce que ce dernier est actuellement de beaucoup le plus répandu, soit parce qu'il est le seul qui puisse être appliqué avec succès à la distribution publique de l'heure, nous traiterons ce sujet important au seul point de vue de ces compteurs, et nous chercherons avant tout à déterminer les conditions de fonctionnement correct d'un cadran électrique tel que ceux que l'on a à installer dans les rues et places d'une ville.

Un tel cadran marche en plein air ; il est exposé à toutes les intempéries et notamment aux changements de température et à l'influence des courants d'électricité atmosphérique. En outre il n'est point seul de son espèce : il fait partie d'un réseau d'horloges semblables à lui, qui toutes doivent marcher dans les meilleures conditions possibles, sans se nuire les unes aux autres et en utilisant au mieux la force du courant qu'elles ont à se parta-

ger entre elles. De là résultent quelques règles fondamentales que nous formulons comme suit :

1^o Éviter l'emploi d'organes trop sensibles aux variations de température ; parmi ceux-ci il faut ranger entre autres et sans hésiter, les ressorts antagonistes des armatures, dont la tension varie considérablement avec la température et l'état plus ou moins humide de l'air (p. 106).

2^o N'employer que des mécanismes électro-magnétiques sur lesquels les courants d'électricité atmosphérique qui suivent les fils conducteurs en temps d'orage, ne puissent en aucun cas provoquer une perturbation permanente.

3^o Combiner la partie électro-magnétique de ces mécanismes de telle façon que pour une intensité de courant relativement faible, elle puisse effectuer un travail mécanique considérable, tout en conservant des dimensions acceptables.

4^o Éviter l'emploi d'armatures à très faible course et à mouvements instantanés ; elles sont incapables de mouvoir, avec la sûreté voulue, des aiguilles de minutes, même équilibrées et protégées, ayant une longueur de plus de 10 à 15 centimètres, mesurée à partir du centre du cadran. Plus le diamètre de ce dernier est grand, plus la course de l'armature doit être longue et s'effectuer lentement ; on comprend en effet facilement qu'une aiguille de 1 $\frac{1}{2}$ mètre de longueur, par exemple, ne puisse accomplir son saut d'une minute en un dixième de seconde, sous l'influence d'une armature dont le déplacement n'est que de un ou deux millimètres au plus.

5^o Enfin proportionner la grandeur des mécanismes des réceptrices aux diamètres des cadrans qu'ils doivent actionner, de telle façon que l'énergie en watts absorbés par l'électro-aimant d'un cadran de grande dimension, soit égale à celle qu'absorbe l'électro-aimant d'un cadran à petit ou moyen diamètre ; en d'autres termes assurer, autant que possible, l'uniformisation des courants individuels de chaque horloge secondaire, quelles que soient la situation et les dimensions de celle-ci.

En examinant les diverses conditions que nous venons d'énumérer, on arrive à la conclusion nécessaire que les électro-aimants à armatures polarisées sont seuls capables d'y satisfaire pleinement. En effet, avec ceux-ci, point de ressorts antagonistes ; les courants alternativement renversés, envoyés par l'horloge-mère, produisent, à eux seuls, les deux mouvements (aller et retour) de l'armature lorsque celle-ci est oscillante et tous les mouvements

lorsqu'elle est tournante ; l'électricité atmosphérique pourra bien provoquer prématurément, c'est-à-dire avant l'arrivée de l'émission régulière, l'un ou l'autre de ces mouvements, mais jamais plusieurs consécutivement, en sorte qu'en fin de compte, une avance permanente de l'aiguille de la réceptrice sur le temps de l'horloge-mère ne sera pas possible. L'intensité de courant nécessaire au bon fonctionnement d'une armature polarisée est, toutes choses égales d'ailleurs, beaucoup plus faible que celle qu'absorbe un électro-aimant à armature ordinaire pour émissions de courant toujours de même sens ; cela se comprend bien, puisque la plus grande partie de l'intensité du courant disponible est, dans le cas de l'armature non-polarisée, employée à vaincre la résistance du ressort antagoniste ou du contrepoids de cette armature (p. 107). L'armature polarisée, qu'elle soit oscillante ou tournante, satisfait facilement, pour peu qu'elle soit combinée en conséquence, à la condition d'une course longue et d'un ralentissement automatique, croissant avec la longueur et la masse des aiguilles à actionner. Enfin l'expérience a appris que trois grandeurs échelonnées des mécanismes à armatures polarisées, permettent de desservir tous les diamètres de cadrans secondaires à aiguilles protégées, depuis 10 à 300 centimètres, en assurant à tous la même sûreté de marche, avec une énergie moyenne absorbée de 0,1 watt par cadran.

Contact-interrupteur. — L'interrupteur de l'horloge-mère constitue le quatrième et dernier organe fondamental de toute distribution électrique de l'heure. Nous avons déjà eu affaire avec lui en nous occupant des horloges électriques indépendantes ; mais comme il ne jouait là qu'un rôle non pas précisément accessoire, mais cependant d'importance moindre que celui qui lui est attribué dans les horloges-mères, nous avons renvoyé jusqu'au présent chapitre III son étude analytique.

La seule condition à laquelle ait à satisfaire un bon interrupteur est celle-ci : offrir au courant un passage sans obstacle ou, mieux dit, sans résistance. Pour cela, il faut : 1^o que les surfaces de contact soient pures, c'est-à-dire exemptes de tout dépôt de matières non-conductrices du courant ; 2^o qu'au moment de leur fonctionnement, ces mêmes surfaces soient pressées l'une contre l'autre avec une force suffisante et, autant que possible, proportionnée à l'énergie du courant qui doit y passer.

Or, par leur fonctionnement même, ces surfaces tendent à se détériorer. Les étincelles des extra-courants produisent à plus ou moins

bref délai sur les contacts à base de métal, une couche d'oxyde peu susceptible de conduire le courant ; d'autre part, la poussière (ou d'autres matières interposées) peut facilement empêcher de bons contacts. En ce qui concerne la seconde condition ci-dessus posée, on comprend facilement qu'une pression de quelques milligrammes entre les deux parties du contact soit parfaitement incapable de livrer passage à une émission de courant qui doit actionner électromagnétiquement et d'un seul coup une cinquantaine de cadrans secondaires dont chacun peut absorber jusqu'à 25 milli-ampères sous 4 volts, par exemple, ce qui, dans le système en dérivation, correspond, au total, à un ampère et quart.

On dispose actuellement de plusieurs moyens pour éviter ou tout au moins fortement atténuer les effets des extra-courants.

L'un des plus efficaces consiste à offrir à l'extra-courant un circuit fermé d'où l'interrupteur proprement dit est exclu et où il peut circuler et s'anéantir sans dommage ; c'est le système qu'a adopté Hipp dans la plupart de ses interrupteurs de circuits horaires et qui lui a fourni de bons résultats ; la figure 189 en donne le principe. L'ensemble des deux leviers 1 et 3 comporte deux contacts : l'un 1-2 est fermé tant que l'autre 1-3, qui constitue l'interrupteur proprement dit, n'est pas en fonction ; mais à peine 1-3 est-il fermé (par une pression mécanique

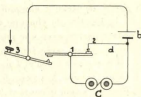


Fig. 189

exercée dans le sens de la flèche sur l'extrémité gauche du levier 3) que 1-2 s'ouvre et alors le courant de la pile *b* circule dans l'électro-aimant *c* de l'horloge. Le circuit (fermé momentanément) où circule et s'anéantit l'extra-courant est *cd 2 1 c* ; on peut toujours, par une disposition appropriée des organes mécaniques, s'arranger de manière que le court instant pendant lequel les deux contacts 1-3 et 1-2 sont fermés simultanément, ait une durée suffisante, soit un demi à un dixième de seconde. La figure 190 donne une vue schématique de l'un des contacts à triple lamelle décrits à pages 239 et suivantes à propos de la pendule de précision de Hipp. Les trois lamelles légères *a*, *a'*, *a''* sont juxtaposées sur un seul couteau *b* en platine iridié qui leur sert d'axe commun. Un deuxième couteau *c* de même matière, fixé par une pièce en forme d'équerre à la partie oscillante de la suspension à ressort du pendule, forme la seconde

partie de l'interrupteur proprement dit. Le contact auxiliaire *d* joue ici le même rôle que le contact de même espèce 1-2 de la figure 189, c'est-à-dire qu'il offre à l'extra-courant un circuit fermé momentanément au commencement et à la fin de chaque contact principal *b-c* et supprime ainsi l'étincelle en *b-c*. Les excellents services qu'a rendus l'interrupteur à lamelles de Hipp, doivent être attribués en

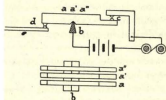


Fig. 190

partie au fait suivant : le plan des trois lamelles *a*, *a'*, *a''* n'est pas si rigoureusement parallèle au couteau *c* que celui-ci les touche toutes en même temps ; il commencera par entrer en contact avec l'une d'elles, la plus élevée, puis avec la seconde, puis avec la troisième. A la fin de l'émission un phénomène analogue se produit en sens in-

verse, le couteau *c* abandonnant successivement les trois lamelles. Or, la légèreté de chacune de celles-ci est assez grande pour qu'un contact partiel avec une seule d'entre elles ne permette pas au courant de passer avec son maximum d'intensité ; ce maximum n'est atteint que peu à peu et à mesure qu'un plus grand nombre de lamelles étant touché, la valeur de la pression au contact est devenue suffisante. De même le courant ne cesse totalement qu'après avoir passé par des intensités de valeurs intermédiaires. L'émission acquiert ainsi une forme ondulée particulièrement propre à la suppression des effets nuisibles des extra-courants.

Dans les interrupteurs des figures 189 et 190, la source de courant est en circuit court pendant les instants de brève durée où les deux contacts, le principal et l'auxiliaire, sont fermés. Il en résulte une dépense de courant plus forte qu'il n'est utile. On peut éviter cet inconvénient, dans le cas de la figure 189, en intercalant entre 2 et *d* une résistance ohmique.

Parmi les moyens plus récemment appliqués pour supprimer les étincelles aux contacts, il faut citer encore ici les suivants :

a) Une simple bobine bifilaire *r* (fig. 83, p. 122) est intercalée en dérivation au commencement de la ligne principale d'un groupe de réceptrices (fig. 191). Il résulte de là une certaine augmentation de la dépense de courant, qu'on réduit d'ailleurs à un minimum en choisissant la résistance de cette bobine assez élevée pour ne compro-

mettre en rien le bon fonctionnement des réceptrices et cependant assez basse pour que les extra-courants puissent y circuler efficacement. L'expérience a montré que cette résistance pouvait être approximativement égale à celle de deux ou trois réceptrices intercalées en dérivation. La perte de courant correspondante ne joue qu'un rôle négligeable dans les installations horaires où ce sont des accumulateurs ou des piles primaires à grande surface qui sont employés comme sources de courant. Cette perte est largement compensée par l'extrême simplicité d'application et la grande efficacité de ce système, qui a en outre l'avantage d'éliminer les effets perturbateurs des extra-courants de 2^{me}, 3^{me}, etc., ordres ; on sait que ceux-ci changent de sens à chaque ordre et pourraient provoquer des mouvements intempestifs d'armatures polarisées très sensibles et mal défendues contre eux.

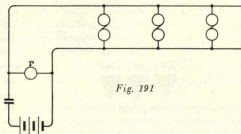


Fig. 191

b) Un condensateur de quelques microfarads (tel que ceux qu'on emploie en télégraphie et en téléphonie et que des fabriques spéciales livrent dans de bonnes conditions de fonctionnement et de prix) est intercalé en dérivation, soit aux bornes du contact lui-même, soit, mieux encore, aux bornes de l'électro-aimant (ou de la ligne des réceptrices). Ainsi placé dans le circuit parcouru par le courant de la source, le condensateur se charge, puis intercepte, tôt après, ce courant de charge, jouant, vis-à-vis de lui, le rôle d'un isolant à très grande résistance. La tension du courant, surélevée par l'extra-courant, trouve dans le condensateur un excellent chemin de détente. Le condensateur se décharge au moment de la cessation du courant de la source. Dans la plupart des cas, ce courant de décharge est trop bref pour perturber les positions des armatures des réceptrices, lorsque celles-ci ne sont pas très sensibles. Par contre, là où elles sont très sensibles, il faudra offrir au courant de décharge un circuit approprié, par exemple la terre.

c) On a employé plus récemment, avec succès, paraît-il, au lieu du condensateur, ce que les Allemands appellent des « cellules de

c) On a employé plus récemment, avec succès, paraît-il, au lieu du condensateur, ce que les Allemands appellent des « cellules de

polarisation » (Polarisationszellen). Ce sont de petites ampoules en verre, hermétiquement fermées et partiellement remplies d'une solution d'acide sulfurique au dixième. Dans cette solution plongent côte à côte et sans se toucher, deux petits fils de platine qui, traversant les parois de l'ampoule, servent de bornes d'amenée du courant.

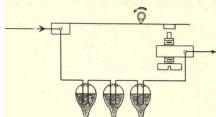


Fig. 192

grande que celle du ou des électro-aimants récepteurs. On peut régler cette résistance soit en écartant plus ou moins les fils de platine, soit en modifiant le degré de concentration de la solution acidulée.

d) M. Ferdinand Schneider, dont nous avons décrit à pages 201 et suivantes, l'horloge à remontoir rotatif, a eu l'idée de remplacer le condensateur ou les cellules de polarisation, ci-dessus mentionnées, par un « tube de Branly » comme on l'a employé en T. S. F. (p. 155) et qui est constitué, comme on sait, par des grains de limaille métallique enfermés et quelque peu serrés entre deux électrodes également métalliques à surfaces internes polies, qui forment tampons dans un tube de verre. Les fils extérieurs de ces deux électrodes sont reliés aux deux parties du contact à protéger. Schneider emploie comme limaille, selon les circonstances, soit des grains d'acier trempé très dur, soit de la simple limaille de fer. Pour éviter une trop grande perte de courant à travers le tube, ce dernier est, après chaque fermeture de contact, automatiquement secoué par un organe *ad hoc* du mécanisme d'horlogerie, ce qui rompt instantanément le pouvoir conducteur du tube (voir Brevet allemand N° 184708 et l'ouvrage, déjà cité ailleurs, de TOBLER-ZACHARIAS : *Elektrische Uhren*, Hartleben, Wien).

Les deux parties d'un interrupteur à mettre en contact l'une avec l'autre pour livrer passage au courant, sont ordinairement métalli-

Dans la plupart des cas, trois ou quatre de ces cellules intercalées en tension dans une dérivation placée à cheval sur l'interrupteur sont suffisantes (fig. 192). La résistance totale de ces cellules doit être environ dix fois plus

ques. Lorsque le voltage et l'intensité de ce courant sont très faibles, comme c'est le cas, entre autres, lorsqu'il s'agit de maintenir en oscillations le pendule d'une horloge électrique indépendante, il suffit de rayer sur les surfaces de l'interrupteur de petites plaques en métal peu oxydable, ou, ce qui revient au même, difficilement fusible, tel que le platine dur, ou le platine iridié à 10, 20, 30 et quelquefois 40 pour cent. Toutefois, ces deux métaux, dont l'un, le platine, fond à 1775°, et l'autre, l'iridium, à 1950°, étant très coûteux, on ne pourra guère les employer que dans des instruments de haute précision (pendules d'observatoires) où il n'y a, le plus souvent, qu'un seul contact, ou dans les cas les plus rares, quelques contacts à mettre en jeu, où d'autre part la question du prix élevé des matières employées est de peu d'importance et où, enfin, chaque contact principal peut être défendu efficacement contre les extra-courants.

Par contre, dans les instruments plus courants, tels par exemple que les horloges-mères pour réseaux restreints, on peut se contenter d'employer le platine dur, sans alliage d'iridium pour les contacts principaux, et le plus souvent l'argent, l'argenté, le cuivre et même l'acier pour les contacts auxiliaires (renverseurs de courant, etc.) non exposés aux étincelles d'extra-courants. On fera cependant bien de préférer le platine dur aux métaux moins nobles, partout où la question d'un fonctionnement irréprochable prime celle du prix.

On peut aussi obtenir de bons contacts au moyen du mercure, métal liquide, dont le coefficient de résistance électrique, bien qu'un peu plus élevé que ceux des métaux solides et peu fusibles, est loin de dépasser la limite pratiquement acceptable. Les contacts à mercure ont l'avantage de s'opérer à travers la masse même du liquide et d'être très intimes. Ils présentent d'autre part les graves inconvénients suivants : le mercure s'évapore facilement et bout déjà à 375°. Laisse à l'air libre, il est rapidement oxydé par le courant et sa surface se couvre alors d'une espèce de peau sale et peu conductrice qu'on est obligé d'enlever fréquemment. On peut remédier partiellement à cet inconvénient en séparant le mercure de l'air par une couche de pétrole que la seconde partie du contact (ordinairement une pointe ou une aiguille en fer ou en acier), doit traverser.

La meilleure manière d'employer le mercure comme métal de contact, est de l'enfermer dans un vase hermétiquement clos dans lequel on a fait préalablement le vide ou qu'on a rempli d'un gaz réducteur. Ce vase est disposé de telle façon que deux fils de platine traversant ses parois en deux endroits différents (fig. 193 et 194)

puissent alternativement être séparés et reliés électriquement par la petite masse de mercure enclose en lui. L'horloge-mère peut produire mécaniquement les deux mouvements correspondants du vase soit par basculage (fig. 193), soit par rotation (fig. 194).



Fig. 193



Fig. 194

poinds des horloges de clochers (p. 205), les contacts qui ferment les circuits doivent avoir une construction beaucoup plus robuste que celle qui est admissible dans les mouvements d'horlogerie de petit volume. Là, il ne peut plus être question de plaquettes en platine ou

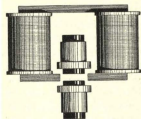


Fig. 195

Lorsque le courant auquel l'interrupteur doit livrer passage a un voltage élevé, comme celui qui actionne les moteurs rotatifs branchés sur les réseaux urbains de force ou de lumière et qui remonte les

autres métaux peu oxydables (or, argent, etc.). Les surfaces de tels contacts devant et pouvant être beaucoup plus grandes, leur course plus longue et leur pression plus intense, il suffira d'employer des matières peu coûteuses telles que le cuivre, l'argent, l'acier, etc. Certains constructeurs ont préconisé, dans certains cas où des contacts à long frottement ne sont pas possibles, l'emploi de pastilles de charbon arti-

ficiel très dur qui peuvent supporter, sans se consumer, des températures supérieures à 1500°.

Quelle que soit la matière adoptée, il faut, dans le cas des courants industriels à haut voltage, disposer les contacts de manière à éviter la formation d'arcs voltaïques entre les surfaces, au moment où celles-ci se séparent ; il est nécessaire pour cela que cette séparation se fasse le plus brusquement possible. On peut aussi employer des électro-aimants souffleurs d'arc, qu'une dérivation du courant fort excite au moment où se produit la rupture (fig. 195).

La question de la *durée* la plus favorable à donner à un contact suggère à M. Albert Berner, auteur de *l'Initiation de l'horloger à l'Électricité*, les réflexions suivantes qui sont judicieuses :

« Quelle doit être, demande cet auteur, la durée d'un contact ? Aussi courte que possible, dans l'intérêt de la pile.

« Mais cette économie a des limites que fixent les dimensions et le poids des organes à mouvoir. S'il s'agit d'un électro-aimant dont l'armature a à mettre en jeu un simple déclenchement très sensible, ou à armer un ressort d'une faible quantité, quelques centièmes de seconde suffiront. Dans la plupart des autres cas, il sera préférable de pécher par excès de durée : un contact un peu long use simplement la pile plus rapidement, tandis qu'un contact trop court peut provoquer des « ratés » ou des arrêts. Il est bon aussi de se souvenir que l'épaississement des huiles, les poussières, l'oxydation, tout contribue, avec le temps, à nécessiter, pour le bon fonctionnement des organes, un effort plus considérable. Dans les systèmes d'unification de l'heure par l'électricité, l'horloge-mère envoie, à intervalles réguliers, un courant aux horloges secondaires. La durée de ce courant doit évidemment être proportionnée à la grandeur et au poids des aiguilles à actionner. Bien que celles-ci soient équilibrées sur leur axe, elles ne peuvent, en raison de leur masse et de leur longueur, passer brusquement du repos au mouvement ; le courant doit d'abord vaincre leur inertie ; mais une fois qu'elles sont en mouvement, l'effort nécessaire pour les conduire est extrêmement réduit. Le même raisonnement s'appliquerait à des mécanismes d'horloges indépendantes constitués par des leviers relativement lourds ou ayant de longs chemins à parcourir. »

En tenant compte de ce qui précède et de ce que nous avons déjà exposé à la fin du paragraphe précédent intitulé « Récepteurs », on arrive à fixer à un minimum de 0,8 seconde, la durée d'un contact de groupe dans les horloges-mères des grands réseaux urbains.

Il ne suffit pas qu'un interrupteur fonctionne bien, électriquement parlant, et que toutes les précautions aient été prises pour le protéger efficacement contre les extra-courants, il faut encore que son jeu mécanique soit sans reproche. Combien d'inventeurs ont négligé ce point essentiel ! Une pendule à poids ou à ressort est donnée ; on veut en faire l'horloge-mère d'un système de cadrans secondaires ; rien de plus simple en apparence : une goupille est adaptée à la roue d'échappement, un ressort isolé à la platine, et voilà l'interrupteur

qui, fermé à chaque minute, est chargé de fournir les émissions du courant. Au bout de quelques jours de fonctionnement, on s'aperçoit que la pendule, dont la marche était auparavant irréprochable, n'est plus susceptible d'être réglée ; elle avance ou retarde, parfois même elle s'arrête ; quant aux contacts, ils sont des plus capricieux ; bref, c'est un insuccès complet. C'est le moment alors de bien se pénétrer de l'axiome suivant :

Pour avoir un appareil à contacts agissant sûrement et n'ayant en outre aucune mauvaise influence sur la marche de l'horloge-mère, il faut :

Ou bien l'adapter à un mouvement d'horlogerie indépendant de l'horloge-mère proprement dite et déclenché aux moments voulus par cette dernière ;

Ou bien n'employer comme horloges-mères que de robustes mouvements d'horloges de clocher ;

Ou bien enfin constituer ces horloges-mères par des horloges électriques indépendantes chez lesquelles le balancier régulateur est lui-même directement soumis aux impulsions électromagnétiques chargées d'entretenir son mouvement oscillatoire.

En dehors de ces trois alternatives, qui, toutes trois d'ailleurs, peuvent fournir de bons résultats, il n'y a pas de succès durable possible.

Nous étudierons, dans un des prochains chapitres, quelques dispositions d'horloges-mères ayant fait leurs preuves.

A. Compteurs électrochronométriques.

Généralités et sous-classification. — L'expression *compteur électrochronométrique*, dont le comte Th. du Moncel a fait un grand usage dans son célèbre « Exposé des applications de l'électricité », est de moins en moins employée dans la pratique, sans doute à cause de sa longueur. On lui substitue parfois celle de *minuterie électromagnétique* qui n'est guère plus courte et le plus souvent celle de *réceptrice*, qui a d'ailleurs l'inconvénient de désigner n'importe quelle espèce d'horloge secondaire. En Allemagne, c'est le mot *Nebenuhr* qui est généralement employé et qui donne lieu à la même remarque. Cela soit dit pour éviter tout malentendu et pour bien établir que ces diverses expressions s'appliquent, le plus souvent, à une seule et même catégorie d'horloges secondaires électriques, celle où le courant venu de l'horloge-mère est le seul et unique *moteur* des aiguilles.

La grande classe des compteurs électrochronométriques peut être divisée en deux sous-classes qui comprennent :

a) Ceux de ces appareils horaires où les émissions lancées par l'horloge-mère sont toutes de même sens ;

b) Ceux de ces appareils où ces mêmes émissions sont alternativement renversées.

Chacune de ces deux sous-classes *a* et *b* pouvant encore se subdiviser en deux catégories, selon que l'armature de l'électro-aimant est oscillante (en va-et-vient), ou tourne par saccades toujours dans le même sens, on obtient une classification secondaire dont les quatre paragraphes suivants donnent les titres sous lettres a_1 , a_2 , b_1 , b_2 .

a₁) Compteurs électrochronométriques pour courants toujours de même sens et chez lesquels l'armature est oscillante.

Sous sa forme la plus simple, le compteur électrochronométrique consiste en un électro-aimant *a* (fig. 196) dont l'armature plate *b* est fixée à un levier *c* articulé en *d*. Un cliquet d'impulsion *e*, pivoté sur ce levier, réagit sur un rochet *f* et le fait avancer d'une dent à chaque oscillation complète du levier d'armature *c* ; *g* est le cliquet de retient et *h* un butoir de sûreté empêchant qu'il n'y ait plus d'une dent de *f* qui échappe. Tel qu'il est représenté sur la figure 196, le cliquet d'impulsion *e* fait avancer le rochet sous l'influence du ressort antagoniste *i* ; l'attraction de l'armature détermine, par contre, le placement du cliquet *e* derrière la dent à faire avancer. On conçoit facilement qu'un effet inverse puisse se produire, si l'on donne au cliquet d'impulsion la forme en crochet de la figure 197 ; dans ce cas, le rochet avance d'une dent au moment de l'attraction de l'armature, et le rappel de celle-ci par le ressort antagoniste provoque le placement du cliquet derrière la dent suivant immédiatement celle qui vient d'être actionnée.

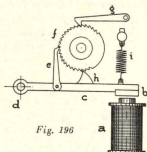


Fig. 196

Le rochet, qui a ordinairement 60 dents, porte sur son axe, prolongé en avant du cadran, l'aiguille des minutes ou des secondes, selon que l'horloge-mère expédie toutes les minutes ou toutes les secondes, les

émissions de courant chargées d'actionner le compteur. Une minuterie ordinaire transmet, en le transformant convenablement, le mouvement du rochet à l'aiguille des heures (respectivement des minutes et des heures).

Certains constructeurs, voulant utiliser les deux mouvements,

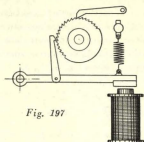


Fig. 197

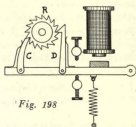


Fig. 198

aller et retour, de l'armature et faire avancer le rochet de deux demi-dents à chaque émission du courant, ont fait usage pour cela de deux cliquets d'impulsion. Les figures 198 et 199 donnent deux exemples de ce type. Dans la figure 198, les deux cliquets, dont l'un, *C*, est droit et l'autre, *D*, à crochet, sont articulés sur le levier de l'armature

et se trouvent placés aux deux extrémités d'un même diamètre du rochet *R*. Lorsque l'armature est attirée, le cliquet *C* fait tourner le rochet d'une demi-dent, mais comme le crochet *D* avance de son côté de la même quantité, il dépasse une dent tout entière et accroche la dent suivante. Au moment où l'armature revient à sa position initiale, c'est le crochet *D* qui, à son tour, fait avancer le rochet d'une demi-dent, et le cliquet *C* qui reprend la dent suivante.

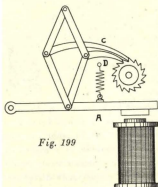


Fig. 199

Dans la figure 199, les deux cliquets *C* et *D* adaptés à un losange articulé, produisent un effet analogue à celui des cliquets de la figure 198. Quand le levier d'armature *A* s'abaisse, le losange s'allonge

et alors *C* avance et *D* recule ; quand, au contraire, *A* se relève, l'inverse se produit. Cette dernière disposition a l'avantage de fournir une grande course des cliquets pour un petit chemin de l'armature ; elle égalise en outre l'effet de la force attractive sur les cliquets, autrement dit, elle constitue ce que du Moncel a appelé un *répartiteur* et Bouasse un *égaliseur d'action*.

Le principe du répartiteur de Robert-Houdin est donné dans

la figure 200. On sait que la force attractive d'un électro-aimant sur son armature actionnée à distance, augmente rapidement à mesure que cette distance (entrefer) diminue (p. 109 et suiv.). Le répartiteur a

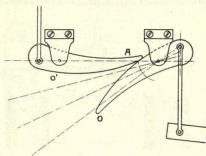


Fig. 200

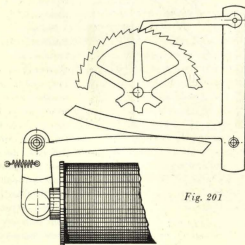


Fig. 201

pour but de faire réagir cette force croissante sur la résistance supposée constante, de telle façon que l'effort exercé sur celle-ci reste lui-même

constant. La simple inspection de la figure 200 fait comprendre que le levier AO' de la résistance diminue dans la même proportion où le levier AO de la force augmente. Les deux courbes de roulement, dont l'une

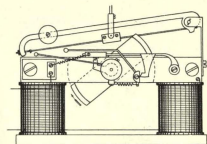


Fig. 202

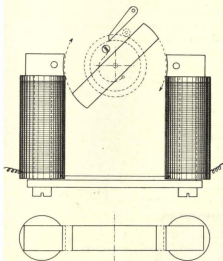


Fig. 203

est d'ailleurs identique à l'autre, doivent être déterminées pour chaque électro-aimant et armature donnés (voir BOUASSE : *Cours de Physique*, tome troisième, deuxième édition, p. 171).

Hipp a l'un des premiers appliqué le principe du répartiteur de Robert-Houdin à une réceptrice rentrant dans la présente classe a_1 . La figure 201 qui la représente est suffisamment explicite.

Nous avons déjà constaté, à propos des horloges électriques indépendantes à remontoir, que la tendance moderne était de substituer aux électro-aimants à armatures plates des figures 196 et suivantes, des systèmes dont l'armature oscille entre les pôles même des électros. Les figures 202, 203 et 204 donnent trois exemples de cette dernière disposition,

dont le grand avantage consiste surtout en ceci que l'armature reste constamment (c'est-à-dire même dans la position non attirée, et par une partie au moins de sa masse), dans le voisinage

immédiat des pôles attractifs. Un second avantage est la course relativement grande de ladite armature, course qui peut atteindre 45 degrés d'arc (et même plus). Il est aisé alors d'utiliser des mouve-

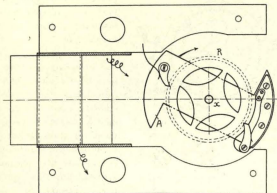


Fig. 204

ments d'aussi grande amplitude pour actionner avec sûreté des rochets de diamètres considérables.

Système David Perret. — L'électro-aimant E est à un seul noyau et à une seule bobine ; son circuit magnétique comprend les deux platines en tôle de fer B (fig. 205) qui sont parallèles et qui portent entre elles l'axe o de l'armature A . Le tout offre ainsi une certaine analogie avec un électro-aimant cuirassé ou blindé. Sur l'axe o de A est monté à frottement doux le rochet R qui a 60 dents et sur la périphérie duquel travaillent les deux cliquets c^1 et c^2 , dont le premier, c^1 , est articulé sur l'une des platines fixes B et l'autre, c^2 , sur l'extrémité du bras B^2 solidaire de l'armature A ; u^1 et u^2 sont deux vis de butée limitant les mouvements des deux cliquets ; l'une, u^1 , est fixée à un second bras B^1 , solidaire comme B^2 de l'armature A ; l'autre, u^2 , est adaptée à un pilier fixe de l'une des platines B . Enfin, un ressort antagoniste r tend à maintenir tout l'équipage mobile dans la position non attirée de l'armature A .

Le fonctionnement de cet ensemble est le suivant : lorsqu'une émission de courant venue de l'horloge-mère parcourt la bobine de l'électro-aimant E , le pôle n du noyau attire fortement l'extrémité inférieure de l'armature A , qui effectue alors un mouvement angulaire

autour de son axe o . Les bras B^1 et B^2 l'accompagnent ; le bec du cliquet c^2 glisse sur le revers incliné de l'une des dents du rochet R et

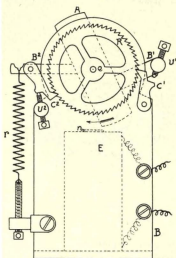


Fig. 205

vient se placer derrière la face radiale de cette dent ; d'autre part, la vis u^1 vient buter sur le talon du cliquet c^1 , et bloque le rochet R . Au moment où le courant cesse dans E , le ressort r ramène l'armature et les bras B^1 et B^2 dans leur position initiale (non attirée), le cliquet c^2 fait avancer d'une dent le rochet R . Ce mouvement est transmis par l'axe o à une minuterie disposée derrière l'une des platines B . L'axe o lui-même, prolongé, porte l'aiguille des minutes.

Système Favarger & C^{ie}.

— Ce système a été imaginé, pour actionner de grandes aiguilles d'horloges monumentales non-protégées par un verre transparent. Les figures

206 (à l'échelle), et 206 bis (en demi-grandeur naturelle), en donnent la disposition. A et A' sont deux forts électro-aimants réagissant simultanément sur une armature commune de forme cylindrique b montée sur un axe c à deux pivots. Cette armature peut effectuer autour de c un mouvement angulaire de 45 degrés d'arc, lorsqu'elle est attirée par les quatre pôles épanouis d , d' , d'' , d''' de A et de A' . e est le ressort antagoniste. Le rochet R , qui est à grand diamètre (220 mm. environ), est pourvu à sa périphérie de 60 dents de forme carrée. Une pièce f à angles arrondis, montée sur l'axe c , porte un tenon excentrique g qui sert d'axe au cliquet d'impulsion h des dents du rochet R . La pièce f est en outre munie d'une goupille carrée k (fig. 206 bis) disposée de telle façon que lorsque l'armature b est arrivée dans sa position attirée (celle dessinée sur la figure), elle vient bloquer le rochet R en se plaçant juste entre deux de ses dents, celles qui sont le plus voisines d'elle. Le bras i porte à son extrémité une vis à écrou l dont la pointe peut peser ou non sur

la queue m du cliquet de retient mn (monté sur un tenon fixe o), selon que l'armature b est elle-même attirée ou non. Le bout recourbé n du cliquet mn taillé lui aussi en carré, bloque à son tour le rochet R .

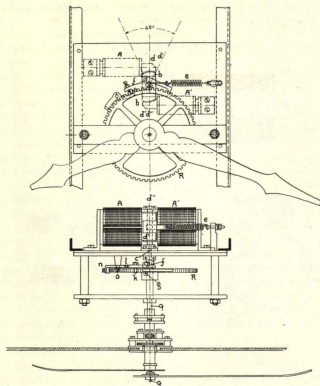


Fig. 206

quand l'armature est dans sa position *non-attirée*. Les diverses phases du fonctionnement de cet équipement mobile sont, en partant de la position non-attirée de l'armature b , les suivantes :

1° Passage du courant dans A et A' et attraction progressive de b .

2° Pendant ce premier mouvement de b , R restant immobile :

- a) glissement du cliquet d'impulsion h par dessus la dent voisine, ce qui fait légèrement basculer le double bras hi autour de son axe g ;
- b) blocage du rochet R par la goupille carrée k qui, solidaire du bras i , se place entre les dents 1 et 2 ;
- c) pression de la vis l sur la queue m du cliquet d'arrêt mn , qui sort alors de l'entre-dents 8-9 et libère ainsi le rochet R .

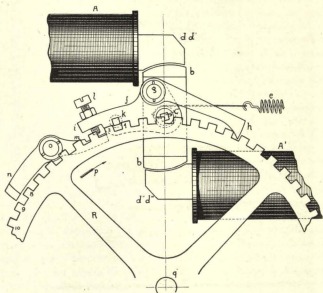


Fig. 206 bis

3° Cessation de l'émission du courant dans A et A' : l'armature b opère son mouvement de retour sous l'influence du ressort antagoniste e ;

- d) la goupille carrée k sort de l'entre-dents 1-2 et débloque le rochet R ;
- e) tôt après, le cliquet d'impulsion h , solidaire de b , fait avancer d'une dent, dans le sens de la flèche p , le rochet R et par suite l'aiguille des minutes fixée sur son axe q ;

- f)* en même temps la vis l cesse de presser sur la queue m du cliquet de retient n ; l'extrémité repliée de n glisse alors sur la surface extérieure de la dent 9 du rochet R ;
- g)* au moment où l'armature b arrive à la fin de sa course, le cliquet n tombe par son propre poids dans l'intervalle des deux dents 9 et 10 et R est de nouveau bloqué jusqu'à l'arrivée de la prochaine émission du courant.

En traçant les épures des sept phases principales des mouvements coordonnés des deux cliquets hi et mn et de la goupille carrée k , tels que nous venons de les analyser, on constate qu'il n'existe aucun moment où le rochet R puisse être entraîné ou contrarié par une poussée en avant ou en arrière du vent, exercée sur l'aiguille des minutes. D'autre part, une pression du vent exercée sur les aiguilles, perpendiculairement à la surface du cadran et capable d'immobiliser momentanément l'armature b (lorsque l'effort de cette pression est supérieure à la force de traction du ressort antagoniste e), aura seulement pour conséquence un *retard* du saut correct de l'aiguille, celle-ci se retrouvant automatiquement sous l'influence de e et du cliquet d'impulsion h , aussitôt terminé le coup de vent retardateur. La parfaite marche de tout l'équipage mobile du mécanisme est ainsi toujours assurée. Afin de réduire au minimum possible les résistances mécaniques que doit vaincre le ressort e en se détendant, tous les axes de la minuterie de l'horloge sont pourvus de roulements à billes.

Les deux électro-aimants A et A' du compteur électrochronométrique qui vient d'être décrit, ne peuvent pas être branchés directement sur les fils de ligne d'une distribution d'heure à minutes ; ils exigent un courant supérieur en énergie à celui qui suffit aux cadrans secondaires à aiguilles protégées et nécessite dès lors la présence d'un relais et d'une source locale de courant.

M. Gustave KRUMM, dans son livre sur les *Horloges électriques*, déjà cité ailleurs (p. 180), décrit un système de compteur électrochronométrique puissant pour horloge monumentale, dont la figure 207 ci-après donne la disposition et qui est caractérisé par l'emploi d'un solénoïde a réagissant par succion sur un plongeur cylindrique k en fer doux qui joue ici le même rôle qu'une armature d'électro-aimant.

Sur l'axe du rochet m à 60 dents est monté, à frottement doux, le bras oscillant h_1 qui porte à son extrémité supérieure la goupille i (faisant saillie en arrière), et, articulé sur son extrémité inférieure, le cliquet d'impulsion f ; h_1 est en outre relié par la petite bielle h_2 avec le levier en équerre h_3 et par le long bras de ce dernier et la petite

bielle h_4 avec le plongeur k . Le levier h_4 porte encore un petit cliquet d'impulsion b qui réagit sur un rochet auxiliaire c . Celui-ci est monté à frottement doux sur l'axe de h_3 avec une roue dentée e qui engrène avec la vis sans fin d d'un volant régulateur ; g est le cliquet d'arrêt de m .

Sous l'influence d'une émission de courant envoyée par l'horlogemère dans le solénoïde a , le plongeur k prend la position attirée (celle que représente la fig. 207). Mais au moment où cette émission cesse, le

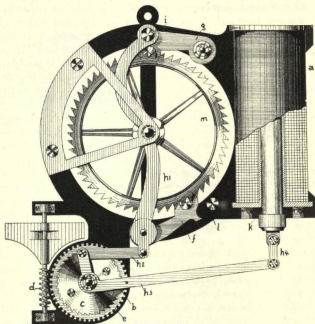


Fig. 207

plongeur, en tombant verticalement par son propre poids, fait osciller le levier h_3 , puis le levier h_1 par l'intermédiaire de h_2 ; le cliquet d'impulsion f fait avancer d'une dent le grand rochet m et provoque ainsi le saut de l'aiguille des minutes calée sur l'axe de m . Ce saut s'effectue en douceur et lentement, grâce à l'action simultanée du petit cliquet b sur le rochet auxiliaire c , sur la roue dentée e et sur le volant à vis sans fin d . Ce volant, qui fait un certain nombre de tours, agit comme un frein sur tout l'équipage mobile.

A l'émission suivante du courant, le plongeur k est de nouveau attiré, les leviers h_1 et h_3 font des mouvements inverses de ceux de tout à l'heure, les deux cliquets d'impulsion, après avoir glissé sur les revers des dents des deux rochets m et c , se placent derrière elles ; ils sont de nouveau prêts à agir au moment de l'interruption du courant, et ainsi de suite. Pendant l'attraction de k , m , c et le volant d sont immobiles. La goupille i , déjà mentionnée, et la goupille fixe l limitent les courses des cliquets f et g ; ils bloquent ainsi le rochet m dans toutes les positions du plongeur k et empêchent que des pressions du vent sur les aiguilles ne viennent perturber la marche correcte du mécanisme.

Il existe une variété quasi infinie de systèmes de compteurs électro-chronométriques pour émissions de courant toujours de même sens. Ne pouvant les décrire tous, et leurs principes étant d'ailleurs peu différents de ceux des compteurs étudiés ci-dessus, nous nous bornerons à citer les noms de quelques-uns de leurs constructeurs les plus connus. Ce sont Mildé, Regnard, Leclanché et Napoli, Garnier, Froment, Colin-Wagner, Robert-Houdin, Liais, Kaiser, Arzberger, Honisch, Campiche, etc. (Consulter les sources de renseignements mentionnées à la page 265.)

a₂) Compteurs électrochronométriques pour émissions de courant toujours de même sens, chez lesquels l'armature tourne par saccades, elle aussi toujours dans le même sens.

Système J. Blondeau. — Nous empruntons à l'ouvrage de M. DECRESSAIN : *L'Horlogerie électrique à l'Exposition universelle de 1900*, la description et la figure 208 suivantes. Entre une platine G et une contre-platine (dont on voit en i et j les piliers de fixation, mais qui dans la figure est supposée enlevée), pivotent les axes f et D de deux mobiles. Sur l'axe f sont calées :

1° une armature tournante en fer doux A , dont la périphérie est munie d'un certain nombre de dents ; les extrémités de ces dents, relevées perpendiculairement au plan du disque qui leur sert de noyau central, forment une couronne de palettes identiques entre elles, qui viennent se présenter, l'une après l'autre, au droit des pièces polaires prismatiques N et S terminant les noyaux magnétiques de l'électro-aimant E ;

2^o une étoile en laiton f' ayant autant de dents que l'armature A et faisant corps avec celle-ci.

Sur l'axe D se trouvent calés solidairement deux leviers, dont l'un, DF , en laiton (ou tout autre métal non-magnétique), est terminé par un sautoir triangulaire en acier d reposant entre deux dents de l'étoile et dont l'autre, DC , en fer doux, passe derrière la roue, contourne l'axe de ce mobile et aboutit en C près du pôle N de l'électro-aimant E .

Voici comment fonctionne cet ensemble : au moment où l'émission de courant venant de l'horloge-mère circule dans la bobine de E , les

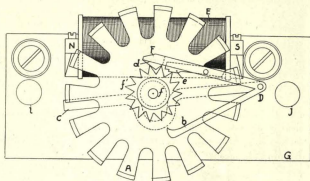


Fig. 208

pôles NS attirent à eux le levier en fer doux DC ; celui-ci entraîne dans son mouvement le bras DF et dégage l'étoile de son sautoir d . L'armature dentée A , devenue libre, obéit, elle aussi, à l'attraction magnétique, en sorte que deux de ses dents, celles qui en sont le plus voisines, viennent instantanément se placer au droit des pôles N et S de E . A effectue ainsi un premier mouvement de rotation angulaire dont l'amplitude est d'environ une demi-dent de A . Dès que le courant cesse, le levier DC retombe par son poids, entraînant, cette fois de haut en bas, le levier DF et son sautoir d ; celui-ci, grâce à son plan incliné antérieur, exerce une pression sur le revers de la dent de l'étoile f' qu'il a rencontrée et provoque ainsi un second déplacement angulaire de la roue A , de même sens que le premier ; l'effet de ce second mouvement est de mettre les deux dents suivantes de A dans la position où elles peuvent à leur tour subir l'attraction magnétique de N et de S que provoquera la prochaine émission de courant en-

voyée par l'horloge-mère. Le petit levier *e* est un cliquet de sûreté qui est logé, avec son axe, dans un évidement du bras *DF* et dont la tête est constamment en contact avec les dents de l'étoile. Pendant le repos des pièces mobiles, une dent de l'étoile se trouve insérée entre le plan postérieur du sautoir *d* et la tête du cliquet *e*, ce qui met la roue dans l'impossibilité de reculer. Après le premier déplacement de *A* (celui qui s'effectue sous l'influence magnétique), la dent qui était bloquée se trouve portée un peu au delà de la pointe du sautoir, tandis que la dent qui suit est engagée dans le fond de l'encoche inférieure de la tête du cliquet *e*. A cette situation des pièces correspondent une impossibilité pour la roue *A* de retourner en arrière et en même temps la certitude que l'action *mécanique* à venir achèvera, dans les conditions exigées, le mouvement angulaire de l'étoile et de la roue *A* commencé par l'action *magnétique*.

Le bras inférieur *Db* qui forme une troisième branche du levier *FCD*, existe seulement dans les cas où le mécanisme ci-dessus décrit est appliqué à des cadrans de grandes dimensions. Le bras *Db* s'élève alors en même temps que les branches *FD* et *CD* et la pointe légèrement recourbée *b* vient se loger entre deux dents de l'étoile pour bloquer celle-ci et empêcher tout excédent de parcours angulaire en avant, que pourraient provoquer soit le poids de l'aiguille déplacée brusquement, soit encore l'action du vent. Enfin mentionnons encore le fait que par son poids, la branche *DC* contribue à assurer la stabilité du sautoir *d* entre les dents de l'étoile, quand le système est au repos (absence de courant dans *E*). Dans cette même position de repos, la roue-armature *A* a toujours deux de ses dents placées, l'une au voisinage supérieur, l'autre au voisinage inférieur des deux pôles saillants *N* et *S* de l'électro-aimant *E*.

L'axe *f* de *A* porte un pignon convenablement nommé qui engrène avec une roue dentée dont l'axe porte l'aiguille des minutes et actionne la minuterie et, par celle-ci, l'aiguille des heures. Aiguilles et minuterie sont placées de l'autre côté de la platine *G*.

Système Arzberger (Brünn, 1870-75). — Il ressemble beaucoup au précédent, auquel il est d'ailleurs antérieur de plusieurs années. La figure 209 en donne la disposition. Entre les pièces polaires *n* et *s* de l'électro-aimant *MM*, est suspendue une armature dentée *r* en fer doux. Ses dents, au nombre de six, se terminent à la périphérie par des courbures qui sont légèrement excentriques par rapport à l'axe de *r*. Dans la position de repos, deux de ces six dents, celles qui sont le plus voisines des pôles *n* et *s*, occupent par rapport à ceux-ci une

position telle qu'une émission de courant venant de l'horloge-mère et excitant les deux noyaux de l'électro-aimant MM_1 , a pour effet de provoquer, par attraction magnétique, un premier déplacement angulaire de r . Un second déplacement, dans le même sens que le premier, se produit mécaniquement au moment où cesse l'émission du courant dans MM_1 et cela grâce à un petit pendule d en forme de marteau

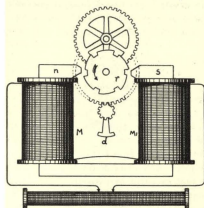


Fig. 209

ment, l'autre mécaniquement, et auquel correspond chaque fois un saut en avant de l'aiguille des minutes. Les deux réceptrices Arzberger et Blondeau sont ainsi basées sur le même principe ; elles ne diffèrent entre elles que par la disposition des pièces mobiles.

Système Spellier (Washington). — Un troisième exemple d'une réceptrice rentrant dans la présente catégorie a_2 nous est fourni par l'horloge secondaire Spellier représentée dans la figure 210 ci-contre que nous empruntons au livre du professeur MERLING : *Die elektrischen Uhren*. On voit en R l'armature dentée en fer doux munie de quinze dents a , en E l'électro-aimant dont les pôles e , en forme de biseau, réagissent sur ces dents, et enfin en $xrhc$ un petit levier à poids

¹ La figure et la description de la traduction en français du livre du professeur Tobler, qui nous servent de guides ici, sont trop incomplètes pour que nous puissions nous-même nous rendre un compte exact de la manière dont le professeur Arzberger a réalisé la condition que les deux déplacements, magnétique et mécanique de r , aient lieu dans le même sens.

curseur c , qui, pivoté en x , est chargé de provoquer mécaniquement et au moment où cesse l'émission du courant dans E , le second déplacement angulaire de la roue R (le premier étant, comme dans les horloges Blon-deau et Arzberger, produit magnétiquement). Pour cela, la roulette r du levier $axhc$ amenée, par le déplacement magnétique de R , au delà de la pointe de la dent triangulaire correspondante de la périphérie de R , opère une pression sur le revers en plan incliné de cette dent et produit la seconde saccade.

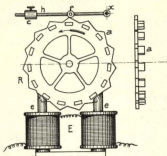


Fig. 210

b₁) Compteurs électrochronométriques pour émissions de courant alternativement renversées, chez lesquels l'armature est oscillante.

Stöhrer a, le premier, appliqué le principe des courants alternativement renversés aux horloges électriques secondaires. La figure 211 représente le mécanisme qu'il a employé en 1849 à Leipzig. L'armature a , polarisée nord par l'extrémité (N) d'un aimant permanent M , peut osciller autour de l'axe x comme centre, entre les jambes d'un électro-aimant EE . Au repos, c'est-à-dire tôt après que a a accompli son dernier mouvement d'oscillation, le magnétisme rémanent transmis par l'aimant M à l'armature a retient celle-ci contre l'une ou l'autre des jambes de l'électro-aimant E , celle qui est la plus voisine de son extrémité p . Mais au moment où E est parcouru par un courant de sens convenable, il se forme en d et en d' deux pôles de noms contraires qui, agissant l'un par attraction, l'autre par répulsion, sur l'armature polarisée a , forcent celle-ci à parcourir rapidement autour de son axe x , l'arc de cercle compris entre d et d' . Les mouvements en va-et-vient de a sont transmis par l'intermédiaire d'une pièce a_1 en forme d'ancre, à une roue dentée R et ensuite à la minuterie et aux aiguilles. Les becs de l'ancre a_1 et les dents du rochet

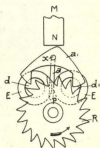


Fig. 211

R sont disposés en conséquence. D'après MERLING, (*Die elektrischen Uhren*, Braunschweig, 1884), l'horloge-mère imaginée par Stöhrer produisait, au moyen de contacts à mercure, les émissions de courant alternativement renversées qui actionnaient les réceptrices dont nous venons de donner la description; la durée de ces émissions était d'une minute pleine, ce qui mettait à contribution la source de courant dans une proportion démesurée. Stöhrer voyait évidemment dans la permanence du courant excitant l'électro-aimant *E* de sa réceptrice, une garantie absolue contre des déplacements intempestifs de l'armature *a* provenant de secousses mécaniques imprimées accidentellement à l'horloge secondaire. Aujourd'hui on obtient l'avantage de la stabilité de l'armature, entre deux émissions successives, en mettant le fer de l'électro-aimant tout entier, par sa culasse, en contact magnétique avec le pôle de l'aimant permanent qui est opposé à celui influençant directement l'armature. Les deux noyaux *d* et *d'* de l'électro-aimant constituent alors ce qu'on a appelé un *pôle fourchu* sud et attirent dès lors avec force et tous les deux indifféremment, l'extrémité oscillante de l'armature polarisée nord.

Compteur à armature polarisée et oscillante de Hipp. — Dans ce compteur, que représentent en vue de derrière et vue de côté les figures 212 et 213, l'axe de l'aiguille des minutes (ou des secondes) porte une roue d'échappement *a* dentée sur le côté en *b* et sur la périphérie en *c*.

Les dents *b* sont soumises aux impulsions alternées des deux palettes *d* et *d'* d'une même verge *e* et constituent avec celle-ci un échappement à roue de rencontre dans lequel seule ladite verge *e* joue un rôle actif. L'axe de *e*, qui est le plus souvent vertical, porte l'armature *f*. Celle-ci, sous l'influence des courants alternatifs envoyés par l'horloge-mère dans l'électro-aimant *E*, oscille entre les noyaux *h* et *h'* de ce dernier. A chacune de ces oscillations, dont l'amplitude est de 60 degrés d'arc, l'une ou l'autre des deux palettes de la verge *e* fait tourner d'une demi-dent la roue d'échappement *a*; celle-ci, ayant 30 dents du type *b*, fait donc un tour en une minute ou en une heure, selon que les émissions du courant ont lieu toutes les secondes ou toutes les minutes. L'armature en fer doux *f*, dont la fig. 214 donne la forme exacte, est polarisée par l'extrémité *n* de l'aimant permanent *k* (fig. 212 et 213) qui, d'autre part, influence par son pôle *s* les deux noyaux en fer doux *h* et *h'* de l'électro-aimant *E*; ces noyaux attirent donc tous deux, et indifféremment, l'extrémité oscillante de l'armature *f*, tant et aussi longtemps qu'au-

un courant ne circule dans les bobines de *E*. Mais si un courant vient à exciter l'électro-aimant *E*, ce dernier deviendra pour son compte, et indépendamment de l'aimant permanent *k*, un fort aimant temporaire ayant aux extrémités *h* et *h'* de ses noyaux deux

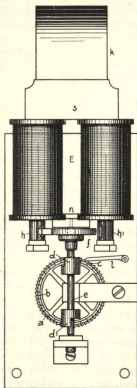


Fig. 212

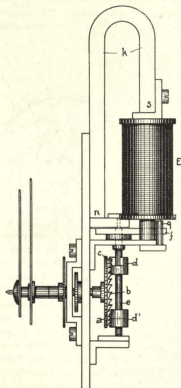


Fig. 213

pôles de noms contraires ; le pôle qui a le même nom que celui de l'extrémité *x* (fig. 214) de l'armature *f*, la repoussera, l'autre l'attirera, et si la position initiale de cette armature est convenable, un mouvement aura lieu soit dans un sens, soit dans l'autre. Lorsque l'émission de courant qui vient d'agir, cesse d'exciter l'électro-

aimant E , celui-ci retombe sous l'influence unique de l'aimant permanent k , l'extrémité libre de l'armature f reste appliquée contre le noyau de E qui l'a attirée tout à l'heure, et elle demeure dans cette position jusqu'à ce qu'une nouvelle émission de courant, de sens contraire à la précédente, vienne l'appliquer contre l'autre noyau, et ainsi de suite. Un cliquet de retient l (fig. 212) travaillant sur la périphérie à dents de rochet c de la roue d'échappement a

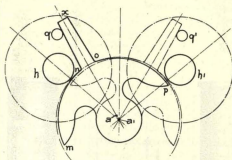


Fig. 214

qui, là, a 60 dents, empêche un recul de cette roue. Les palettes de la verge e servent en même temps de leviers d'impulsion et de butoirs de sûreté. Il n'y a point de ressort antagoniste.

La courbure $mnop$ (fig. 214)

de l'armature de Hipp joue un rôle essentiel pendant les deux mouvements d'aller et de retour de cet organe. Cette courbure est une portion d'arc de cercle ; elle a pour centre un point a qui, placé sur l'axe de symétrie ax , est légèrement en dehors du centre a_1 , représentant l'axe de la verge. Il résulte de cette excentricité aa_1 que, dans la position de l'armature telle qu'elle est représentée sur la figure 214, le noyau de gauche h de l'électro-aimant E est très rapproché du point n de la courbe $mnop$, tandis que son point extrême p est relativement éloigné du noyau de droite h' de E . Autrement dit, l'entrefer nh est de 2 à 4 dixièmes de millimètres, alors que l'entrefer ph' peut varier de 1 à 2 ou même 3 millimètres, selon la grandeur de l'armature. On comprend facilement que cette *asymétrie* des deux entrefers a pour effet de créer, au moment où le courant commence à exciter l'électro-aimant E , un couple qui conduit l'armature, avec une sûreté absolue, de sa position extrême de gauche à sa position extrême de droite et vice versa.

Deux butoirs d'arrêt q et q' limitent la course de l'armature (et par conséquent de la verge e fig. 213) ; chacun d'eux consiste en un petit cylindre vertical qui est rivé sur une patte horizontale fixée

elle-même, au moyen d'une vis, sur l'extrémité du noyau correspondant de l'électro-aimant *E* (fig. 212). Ce petit cylindre, qui est en laiton, est creux et légèrement entaillé parallèlement à sa génératrice ; il est garni, à l'intérieur, d'un petit morceau de drap contre lequel vient buter la queue prismatique *x* de l'armature (fig. 214) ; l'arrêt de celle-ci se fait ainsi silencieusement et sans choc en retour perturbateur.

Chacune des palettes *d* et *d'* de la verge d'impulsion *e* consiste en un petit cylindre d'acier trempé qui est concentrique avec l'axe de cette verge (fig. 213) et qui est entaillé, en son milieu, jusqu'à la hauteur du plan vertical passant par cet axe. Les deux plans qui correspondent aux deux palettes et constituent les fonds de leurs entailles, font entre eux un angle de 45 degrés (voir aussi fig. 215).

Les figures 216 et 217, bien qu'elles s'appliquent à une autre forme de l'armature oscillante de Hipp, donnent cependant une juste idée du fonctionnement des palettes de la verge d'impulsion et de leur action sur les dents de la roue d'échappement.

Elles font voir comment ces deux palettes travaillent alternativement sur les deux dents de cette roue qui sont situées aux deux extrémités d'un même diamètre vertical. On voit, en outre, que les deux plans impulseurs sont disposés de telle manière par rapport aux pointes des dents *b* de *a* (fig. 212), que celles-ci ne sont atteintes et poussées que lorsque l'armature a déjà parcouru une partie assez considérable de sa course totale de 60 degrés. Cette armature a ainsi le temps d'acquiescer à *vide*, c'est-à-dire sans résistance mécanique notable, et sous la seule influence du couple électromagnétique moteur, toute sa force de propulsion ; c'est à ce moment-là seulement que la palette agissante atteint la dent correspondante

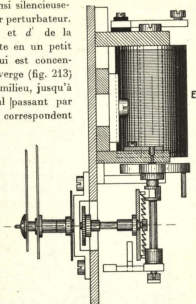


Fig. 215

et la fait avancer d'une demi-dent en entraînant, d'une quantité proportionnelle, l'aiguille des secondes (ou des minutes) et la minuterie.

Enfin les mêmes figures 216 et 217 montrent distinctement comment le revers cylindrique de chacune des deux palettes d'impulsion contribue à assurer, tôt après la fin du mouvement de

l'armature, la stabilité de la roue d'échappement, et joue ainsi son rôle de butoir de sûreté, rôle auquel coopère d'ailleurs le cliquet de retient *l* déjà mentionné ci-dessus.

Une disposition perfectionnée de l'armature de Hipp est représentée dans les figures 215, 216 et 217. Ici l'axe de l'armature, respectivement de sa verge, est situé, non plus en dehors de la ligne idéale reliant entre eux les centres des deux noyaux *h* et *h'* de l'électro-aimant *E*, comme c'était le cas dans la figure

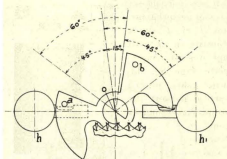


Fig. 216

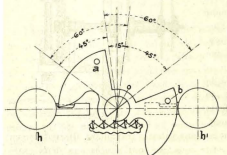


Fig. 217

214, mais bien sur cette ligne, exactement à la moitié de la distance de ces centres.

L'armature perfectionnée consiste elle-même en deux ailes identiques et symétriques dont chacune est influencée séparément par l'un des noyaux *h* et *h'* de l'électro-aimant. La courbure extérieure de chaque aile est légèrement excentrique par rapport au centre de rotation *o* de la verge, en sorte que pour l'une des positions de

L'armature oscillante, c'est l'entrefer de l'aile gauche qui est petit et celui de l'aile droite qui est relativement grand, tandis que c'est l'entrefer asymétrique, créateur du couple électromagnétique moteur. Les cylindres feutrés fixes constituant les butoirs d'arrêt de l'armature sont ici horizontaux et ce sont des goupilles verticales (a et b) placées aux endroits convenables sur la face supérieure de cette armature qui viennent, à la fin de chaque mouvement, buter contre les arrêts fixes. Les diverses observations déjà faites précédemment à propos de la première disposition de l'armature Hipp, en ce qui concerne le fonctionnement de la verge et de la roue d'échappement, sont aussi applicables à la disposition perfectionnée des figures 216 et 217.

Les deux dispositions fournissent d'ailleurs des résultats pleinement satisfaisants, ainsi que le démontrent les milliers de compteurs électrochronométriques de ce système qui fonctionnent, encore aujourd'hui, dans de nombreux réseaux d'unification d'heure, en Suisse et à l'étranger, et dont un grand nombre ont plus de quarante ans d'âge.

Compteur de Siemens et Halske. — Les figures 218 et 219 représentent le mécanisme de ce compteur. L'armature oscillante, qui

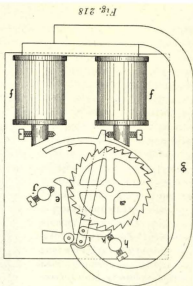


Fig. 218

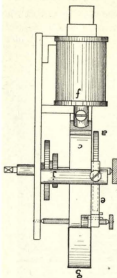


Fig. 219

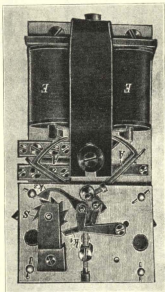
se voit en *c*, est munie, comme celle de Hipp et près des noyaux de l'électro-aimant *ff*, d'une courbure excentrique produisant l'asymétrie des deux entrefers. Elle a son centre de rotation en *i*, à l'extrémité d'un bras relativement long. Sur ce bras sont articulés, d'une part, un cliquet d'impulsion *k* qui, lorsque l'armature oscille de droite à gauche, fait avancer d'une demi-dent la roue d'échappement *a*, et, d'autre part, un second cliquet d'impulsion *e* qui, lorsque l'armature oscille de gauche à droite, fait avancer la même roue *a* d'une demi-dent également. Chacun des deux cliquets *k* et *e* joue alternativement le rôle de cliquet d'impulsion et de cliquet de retient. Deux piliers fixes *h* et *j*, placés derrière ces cliquets, sont munis de vis réglables permettant de limiter très exactement les courses des parties oscillantes de ces cliquets et par suite d'assurer leur fonctionnement correct. Le plan

d'oscillation de l'armature est parallèle à celui des noyaux ; ceux-ci sont traversés de vis réglables contre lesquelles vient buter l'extrémité inférieure du bras d'armature qui est prolongé au delà de la courbure excentrique. L'aimant permanent influence d'un côté l'armature et de l'autre la cu-lasse et les noyaux de l'électro-aimant, se voit en *g*.

Compteur Aron. — Sa dis-

position a une grande analogie avec celle du compteur Siemens et Halske, ainsi qu'on le constate en examinant la figure 220 où *A* est l'armature oscillante, *EE* l'électro-aimant, *S* la roue d'échappement et *k*₁ et *k*₂ les deux cliquets d'impulsion. L'armature *A* est à deux branches et porte deux ressorts qui viennent alternativement buter contre les noyaux même de l'électro-aimant. Celui-ci est tantôt parallèle (fig. 220), tantôt perpendiculaire (fig. 221) au plan d'oscillation de l'armature, selon

Fig. 220



qu'il s'agit d'actionner des horloges secondaires intérieures ou extérieures.

Compteur Magneta. — Ici l'armature *A* est plate et chacune de ses extrémités se trouve dans le voisinage immédiat de l'un des deux pôles de l'électro-aimant *EE*. Elle oscille autour d'un axe *o* (fig. 222) qui est perpendiculaire au plan de *EE*. Elle est très légère parce qu'elle doit obéir presque instantanément aux émissions alternées de très courte durée (0,05 - 0,1 seconde) que son horloge-mère lui envoie sous la forme de courants induits produits mécaniquement par un poids. Elle est pourvue, en son milieu d'un pro-

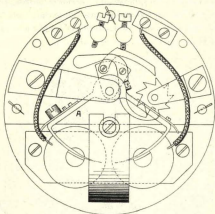


Fig. 221

longement *C* en retour d'équerre (fig. 223) qui la met sous l'influence de l'un des pôles de l'aimant permanent *M*; celui-ci influence, par son autre pôle, la culasse *V* de l'électro-aimant *EE* et par suite ses deux extrémités polaires (pôle fourchu).

L'entrefer asymétrique maximum qui existe, tantôt à gauche, tantôt à droite, entre l'une des extrémités de l'armature plate et le pôle correspondant de *EE*, est de l'ordre du millimètre. Un long bras *B*, terminé par un ressort *F*, transmet les mouvements oscillants de *A* à une pièce *H* en forme d'ancre; les deux goupilles (ou becs) dont les deux bras de cette ancre sont munis poussent alternativement, chaque fois d'une demi-dent, la roue d'échappement *S*, dont l'axe porte l'aiguille des minutes, et qui en tournant toujours dans le même sens, actionne à son tour, de la manière connue, la minuterie *ZW*. Nous retrouvons ainsi, dans le système Magneta, le mode de transformation d'un mouvement de va-et-vient en mouvement rotatif, tel qu'il a été appliqué, en 1840 déjà, par Stöhrer.

Le ressort *F*, dont nous venons de parler, a pour but de permettre que le saut très brusque de l'armature oscillante, soit suivi plus

lentement, en léger décalage, par celui de la roue d'échappement et de l'aiguille des minutes. Ce ressort joue ainsi un rôle analogue à celui du ressort, dit d'entretien, de l'horloge à remontoir décrite à pages 183 et suivantes. Il en résulte que plus l'aiguille des minutes de l'horloge Magneta sera longue et lourde, plus l'action du ressort *F* devra être prolongée, autrement dit, plus la fin du mouvement de cette aiguille devra être en retard sur celui, instantané, de l'armature *A*. Or, un tel retard ne peut être sûrement obtenu que par

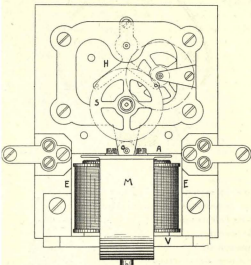


Fig. 222

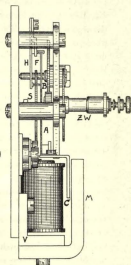


Fig. 223

l'interposition d'un ressort *F* en forme de boudin ou de spiral. Mais nous avons vu que la présence d'un ressort quelconque, dans un mécanisme d'horloge électrique secondaire, constitue un obstacle presque absolu à l'emploi d'un mécanisme pareil dans les réseaux où l'heure unifiée doit être distribuée par des cadrans publics exposés aux intempéries de l'air extérieur. Il résulte, en effet, des expériences faites avec le système Magneta à courants induits presque instantanés, qu'il est inapplicable à l'unification de l'heure par cadrans extérieurs. La très faible course et la légèreté de l'armature *A* ne permettent pas, d'autre part, la suppression

totale du ressort interposé, car la présence de ce dernier est d'autant plus nécessaire que les aiguilles à actionner sont plus longues et, par conséquent, plus lourdes.

Compteur Brillié frères — Nous empruntons la description et les figures du compteur Brillié frères aux articles que M. M. Béache a publiés dans les numéros d'août et septembre 1910 du *Génie civil*. La bobine *I* (fig. 224) est en équilibre indifférent entre les pôles *N*

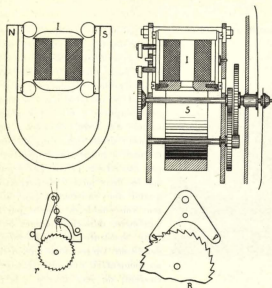


Fig. 224

et *S* d'un aimant permanent. Suivant le sens du courant envoyé dans l'enroulement de cette bobine, celle-ci se déplace dans un sens ou dans l'autre et actionne, soit au moyen d'une ancre, soit au moyen de deux cliquets, la roue à rochet *r* (respectivement *R*) qui commande la minuterie des aiguilles.¹

« Ce système, dit M. Béache, présente l'avantage de comporter un dispositif électromagnétique de grand rendement, compara-

¹ Nous regrettons que ni le texte ni les figures de M. Béache ne réussissent à donner une idée complète et claire du récepteur Brillié dont le principe paraît d'ailleurs judicieux.

ble à celui d'un véritable moteur magnétoélectrique ; on peut ainsi avec des courants de faible intensité, actionner les aiguilles d'horloges de grandes dimensions. D'autre part, la dépense de courant pour les petites horloges est extrêmement réduite. »

b₂) Compteurs électrochronométriques pour émissions de courant alternativement renversées, chez lesquels l'armature tourne par saccades toujours dans le même sens.

Le **compteur Thomas** (fig. 225) paraît être l'un des plus anciens de cette catégorie. L'armature *a*, qui a une forme rappelant celle d'un balancier de montre coupé, et qui est montée sur un axe vertical à vis sans fin *s₁*, est elle-même un aimant permanent dont les pôles nord et sud se trouvent dans le voisinage des coupures *n* et *s*. Les pôles, en retour d'équerre, des deux électro-aimants droits *EE*, sont disposés de manière à réagir simultanément, l'un par attraction, l'autre par répulsion, sur les deux moitiés de l'armature *a*, quand une émission de courant de sens convenable est lancée, par l'horloge-mère, dans les bobines de *EE* ; cette armature accomplit alors un demi-tour. Un second demi-tour a lieu au moment où une autre émission de courant, de sens inverse à la précédente, intervertit les noms des pôles

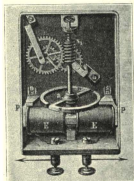


Fig. 225

de *EE*. La disposition en plans inclinés parallèles, de ces pôles, a pour conséquence un arrêt du mouvement de l'armature dans une position telle que la reprise du mouvement rotatif de *a*, au moment où l'émission change de sens, ait lieu dans le même sens que le demi-tour précédent. Cet arrêt se produit automatiquement, alors même que la durée de l'émission du courant moteur est supérieure à celle que l'armature emploie à accomplir sa demi-révolution ; il est la conséquence du fait que le couple-moteur qui fait tourner *a* devient nul dans le sens tangentiel, une fois cette demi-révolution effectuée. Il est même avantageux que les électro-aimants *EE* restent sous courant un certain temps après l'arrêt

automatique de l'armature *a*, afin que la tendance qu'a celle-ci à osciller quelque peu, de part et d'autre de la position d'arrêt, ait le temps de s'éteindre entièrement. Thomas a si bien senti la nécessité d'émissions de courant suffisamment prolongées, qu'il a fixé leur durée à trois secondes, précaution qui lui a permis de faire rentrer dans ses réseaux horaires unifiés des mécanismes qui, pourvus d'armatures à grand diamètre, étaient capables d'actionner directement des aiguilles d'horloges de clocher (Merling). Les mouvements de l'armature Thomas avaient lieu toutes les demi-minutes et commandaient la minuterie par l'intermédiaire de la vis sans fin *s*₁, et de la roue dentée *r*.

Dans le **compteur Grau** que représentent les figures 226, 227 et 228, l'armature tournante *a* consiste en quatre barreaux aimantés *ns* disposés autour d'une pièce centrale carrée *m* en laiton et formant un corps cylindrique vertical. Ces barreaux, qui sont séparés les uns des autres par de petits intervalles, sont disposés de façon à présenter alternativement des pôles nord et sud devant les noyaux des deux électro-aimants *EE*. Ces derniers ne sont pas exactement en face l'un de l'autre (fig. 227) et leurs fils sont enroulés de telle manière que chaque émission de courant alternée développe des pôles de même nom chez les deux noyaux qui se font vis-à-vis. Il résulte de là que les deux pôles sud des barreaux aimantés qui se trouvent à la partie supérieure de l'armature cylindrique seront attirés par les noyaux supérieurs des électro-aimants (si nous suppo-

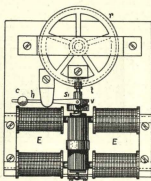


Fig. 226

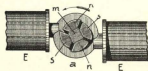


Fig. 227

sons, par exemple, que ces noyaux deviennent, au passage du courant, des pôles nord) et que leurs pôles nord, leurs voisins, seront repoussés par eux. Les noyaux inférieurs des électro-aimants *EE* agissent d'une manière analogue sur les extrémités inférieures des barreaux. Tous ces effets, concordants et ajoutés, impriment à l'armature un mouve-

ment de rotation dans le sens de la flèche (fig. 227), grâce à une légère excentricité des courbes terminales des barreaux, et à la forme en sifflet des noyaux des électro-aimants *EE*. A chaque émission des courants alternés correspond un quart de tour de l'armature. Le

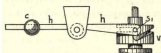


Fig. 228

pignon *t* (fig. 226) et la roue à couronne dentée *r* transmettent ce mouvement à la minuterie et aux aiguilles. Le levier *h* (fig. 228) muni d'un contre-poids *c* et d'une goupille latérale *s*₁, constitue avec

la rainure hélicoïdale creusée à la surface du cylindre *v*, calé sur l'axe de l'armature, un encliquetage qui assure immédiatement, c'est-à-dire tôt après la fin de son mouvement, la stabilité de l'armature

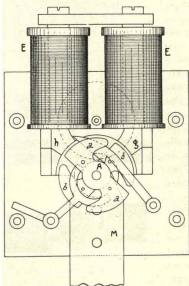


Fig. 229

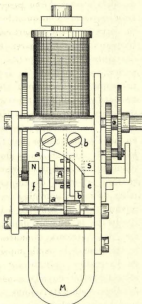


Fig. 230

une fois celle-ci arrivée dans sa position de repos. Cet encliquetage, dit de sûreté, rend inutile la longue durée d'émission jugée nécessaire par Thomas, et permet d'économiser le courant de la pile.

Compteur Wagner. — La maison Wagner à Wiesbaden, qui exploite les brevets Grau, a établi un nouveau type d'horloge secondaire qui est représenté en vue de derrière et de côté par les figures 229 et 230, empruntées à l'ouvrage déjà cité ailleurs de M. l'Ingénieur Zacharias.

Entre les pôles entaillés *h* et *g* de l'électro-aimant *EE* en forme de fer à cheval, peut tourner une double armature en fer doux *aa* et *bb* calée sur un seul et même axe *A*. Chacune des deux parties de cette armature a une forme qui a de l'analogie avec celle perfectionnée de Hipp telle qu'elle est représentée dans la fig. 216. Ces deux parties sont décalées de 180 degrés d'arc l'une par rapport à l'autre. L'une d'elles, *aa*, est tout entière polarisée nord par l'une des extrémités *f* de l'aimant permanent et fixe *M* qui a la forme d'un fer à cheval ; l'autre partie *bb* est polarisée sud par l'autre extrémité *e* du même aimant *M*. Les courbures excentrées, à entrefers asymétriques, des deux ailes de chaque moitié de l'armature double *aa*, *bb*, jouent, par rapport aux pôles *h* et *g* de l'électro-aimant *EE*, lorsque ce dernier est excité, le même rôle que celles de l'armature perfectionnée de Hipp. Un encliquetage de sûreté, ayant la même fonction que celui mentionné à propos de l'horloge Grau, est constitué par une pièce qui travaille à la manière d'une ancre sur quatre goupilles solidaires de l'armature double. Celle-ci effectue un quart de tour à chaque émission alternée ; un pignon et une roue dentée transmettent ce mouvement à la minuterie et aux aiguilles.

Le compteur électrochronométrique **Elektra** (West-deutsch Uhrenfabrik, à Elberfeld), est une imitation de celui de Wagner, dont il ne diffère que par quelques détails de construction insignifiants.

Compteur Bohmeyer. — La maison Bohmeyer, à Halle, fabrique

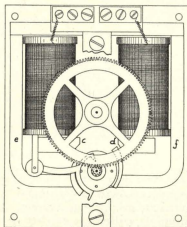


Fig. 231

les deux types de compteurs représentés par les figures 231, 232 et 233 (empruntées au livre de M. Zacharias).

Ici, l'armature consiste en une seule pièce en fer doux avec deux ailettes ayant des courbures excentrées, analogues comme disposition et comme fonctionnement à celles de Hipp. Les deux pôles *c* et *d* (fig. 231) et *a* et *b* (fig. 232) d'un seul électro-aimant en forme de fer

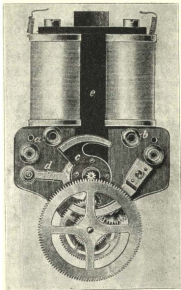


Fig. 232

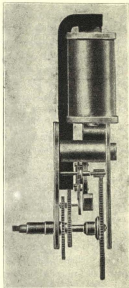


Fig. 233

à cheval polarisé par un (ou deux) aimants permanents *e* (respectivement *e* et *f* de la fig. 231), réagissent de la manière connue sur cette armature qui, à chaque émission alternée, accomplit un quart de tour. Un encliquetage de sûreté assure la stabilité de l'armature lorsqu'elle est au repos, et son fonctionnement correct même dans le cas où l'émission de courant lancée par l'horloge-mère serait accidentellement de trop courte durée.

Compteur Favarger. — L'auteur du présent ouvrage, désireux de simplifier le plus possible le mécanisme d'un compteur électro-

chronométrique rotatif pour émissions de courant alternativement renversées, imagina, vers l'année 1900, la disposition qui est représentée dans la figure 234 et qui comporte seulement :

- 1° Un électro-aimant *EE* en forme de fer à cheval ;
- 2° Un disque-armature *a* en fer doux qui est pourvu à sa périphérie de 30 dents de forme triangulaire (dents de rochet) et qui, en tournant

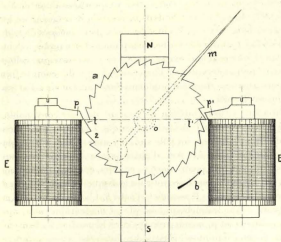


Fig. 234

sur son axe *o*, vient présenter successivement toutes ces dents à l'action magnétique des deux pôles pointus *p* et *p₁* de l'électro-aimant *EE* ;

3° Un aimant permanent *NS* dont le pôle *N* polarise nord le disque armature et dont le pôle *S* polarise sud (en pôle fourchu) les deux noyaux de l'électro-aimant *EE* ;

4° Une minuterie, très simplifiée, qui n'a d'autre but que de transporter sur l'aiguille des heures le mouvement rotatif de l'axe *o* de l'aiguille des minutes *m* (axe qui se confond avec celui du disque-armature).

Fonctionnement. — Lorsque aucun courant ne circule dans les bobines de *EE*, le disque-armature *a* est au repos dans la position que représente la figure 234. Cette position est telle que la pointe *l* de l'une des 30 dents du disque se trouve aussi près que possible, sans

cependant la toucher (la rigidité de l'arbre o s'y oppose), de la pointe du pôle fixe p , tandis que la pointe l' de la dent diamétralement opposée se trouve, d'une demi-dent exactement, au-dessous de la pointe du pôle p_1 de EE . Pour obtenir ce léger décalage, la pointe p_1 est, d'une manière permanente, située un peu au-dessus de la ligne horizontale passant par l'axe o . L'attraction très forte qui existe entre la pointe nord l et la pointe sud p , très rapprochées l'une de l'autre, maintient le disque-armature dans la position de repos. Une attraction magnétique existe aussi entre les deux plans inclinés de la dent l' et du pôle fixe p_1 , mais elle est beaucoup moins forte (grâce à l'entrefer plus grand) que celle qui existe entre l et p , en sorte que celle-ci est largement prépondérante et empêche, en fin de compte, que le disque-armature ne tourne d'une demi-dent pour obéir à l'attraction de p_1 sud sur l' nord.

Maintenant, si une émission de courant de sens convenable parcourt les bobines de EE de telle façon que la pointe p devienne un pôle nord et la pointe p_1 un pôle sud, il y aura, d'une part, répulsion des deux pointes nord l et p et, d'autre part, attraction réciproque de la pointe sud p_1 sur la pointe nord l' , et alors, ces deux actions concordantes s'ajouteront pour faire tourner le disque-armature d'une demi-dent précisément dans le sens de la flèche b . L'arrêt de ce mouvement s'effectuera automatiquement, ou plutôt magnétiquement, aussitôt que les pointes l' et p_1 seront arrivées dans la position où leur entrefer $l'p_1$ sera devenu minimum, c'est-à-dire lorsque l' et p_1 seront pointe contre pointe. L'entrefer lp , par contre, se trouvera dans la position où était l'entrefer $l'p_1$ avant l'émission.

A la minute suivante, l'horloge-mère ayant lancé dans EE une courte émission de courant inverse de la précédente, un nouvel arc de rotation d'une demi-dent se produira, le pôle nord p_1 repoussant la pointe l' et le pôle sud p attirant la dent 2 suivant immédiatement la dent l . Et ainsi de suite à chaque émission alternée.

Après soixante émissions successives, le disque armature a et l'aiguille des minutes m auront accompli une révolution entière en une heure et l'aiguille des heures un tour en 12 heures (ou éventuellement en 24 heures).

Il y a lieu de faire, à propos du compteur qui vient d'être décrit, les remarques suivantes :

a) Le sens de rotation du disque-armature, qui, sur la figure 234 représentant le mécanisme vu de derrière, est l'inverse de celui des aiguilles d'une montre, dépend uniquement du sens dans lequel sont

orientés les plans inclinés des dents de rochet de ce disque (fig. 235). Cette orientation, selon qu'elle est droite ou gauche, correspond à une rotation directe ou indirecte (en appelant direct le sens de rotation des aiguilles d'une montre regardée du côté cadran). Toutefois cette orientation, à droite ou à gauche des dents du disque tournant entraîne nécessairement un déplacement correspondant des pointes des pièces polaires p et p_1 par rapport à la ligne horizontale passant par l'axe de rotation o . En effet, pour le sens de rotation inverse de celui de la figure 234, c'est le pôle p de gauche qui aurait sa pointe décalée d'une demi-dent au-dessus de cette ligne.



Fig. 235

b) Lorsque l'aiguille des minutes à actionner est courte, légère et bien équilibrée par un contrepoids sur son axe o (fig. 234), lorsqu'il y a, en outre, un rapport convenable entre l'intensité magnétique de l'aimant permanent NS et l'intensité du courant électrique circulant dans les bobines de EE , les mouvements saccadés du disque-armature a ont lieu avec une précision, une rapidité et une sûreté qui ne laissent rien à désirer ; il semble, à les observer pendant quelque temps, que l'on ait affaire à une série indéfinie de déclenchements produits instantanément par un véritable « ressort magnétique ». Dans ces conditions, tout encliquetage de sûreté est superflu ; il n'y a plus alors aucun choc entre organes matériels se déplaçant plus ou moins vivement jusqu'à venir en contact les uns avec les autres, et l'horloge secondaire est *silencieuse*. La seule résistance mécanique à vaincre est celle des deux pivots de l'axe du disque-armature frottant contre les parois des trous de leurs supports, résistance qui, extrêmement faible déjà du fait de la grande légèreté de l'aiguille des minutes, peut être réduite à un minimum par l'emploi de trous garnis de pierres dures et de contre-pivots. Quant à la résistance mécanique provenant de la présence de la minuterie et de l'aiguille des heures, elle est à peu près négligeable en raison du rapport de démultiplication considérable qui existe entre le déplacement angulaire déjà très faible de l'aiguille des minutes et celui 12 ou 24 fois plus faible de l'aiguille des heures.

c) Les émissions de courant alternativement renversées actionnant le disque-armature peuvent se succéder avec une rapidité bien

supérieure à celle que nécessite un compteur électrochronométrique à minutes ou à secondes, sans que le fonctionnement correct de ce disque en soit le moins du monde compromis. Le mécanisme de la figure 234, pourvu d'un enroulement convenable sur les bobines de *EE*, a pu être relié directement aux deux fils d'un courant industriel monophasé de 50 périodes par seconde et de 125 volts (ou plus), sans que le synchronisme des mouvements du disque et de ces périodes cessât un seul instant d'exister. Ce disque peut alors jouer le même rôle qu'un induit de moteur rotatif synchrone pour courants alternatifs, et, comme tel, servir à contrôler, moyennant certaines adjonctions faciles à concevoir, la constance de périodicité d'un courant alternatif quelconque (comparer avec p. 219). On peut d'ailleurs imaginer d'autres applications utiles de ce petit moteur très simple dont on augmentera le rendement en constituant l'armature dentée par des tôles de fer mince empilées.

Compteur Favarger pour cadrans de moyens et grands diamètres. — Nous avons vu que le faible déplacement angulaire

du disque-armature de la figure 234 rendait celui-ci impropre à la commande directe d'aiguilles plus longues et plus lourdes que celles qui ont été envisagées dans cette figure. Toutefois, on peut très bien, en conservant le principe du disque-armature denté, employer le compteur Favarger dans les cas où il s'agit d'actionner les aiguilles de grands cadrans électriques secondaires (extérieurs ou intérieurs). Il suffit, pour cela, de diminuer le nombre des dents du disque, jusqu'à ce que le déplacement angulaire correspondant à une demi-dent, acquière une

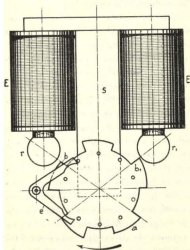


Fig. 236

importance en rapport avec la masse de l'aiguille des minutes à mouvoir. L'expérience a démontré que ce nombre, réduit à cinq et à

trois, permet de desservir, avec une sûreté absolue, toute l'échelle des diamètres de cadrans depuis 10 à 300 centimètres, à condition que les aiguilles, aussi légères que possible (exécutées, par exemple, en tôle d'acier ou d'aluminium mince et nervée), soient bien équilibrées sur leurs axes et protégées par un verre transparent.

La figure 236 donne la disposition schématique d'un tel mécanisme muni du disque-armature à cinq dents, et la figure 237 l'aspect extérieur de ce même mécanisme vu de derrière. On constate, tout d'abord, que les pôles r et r_1 de l'électro-aimant moteur EE consistent en deux petites rondelles plates, de forme cylindrique, qui sont rivées sur les deux extrémités, convenablement entaillées, des noyaux en fer de cet électro-aimant, et qui, faisant ainsi corps avec celui-ci, permettent de fixer le tout sur la platine principale du mécanisme au moyen de deux vis seulement.

Les cinq dents de l'armature a se terminent, à la périphérie, par des courbures excentrées

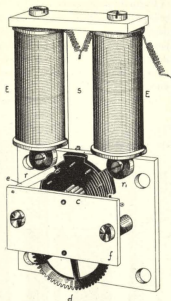


Fig. 237

qui assurent l'asymétrie des deux entrefers rb et r_1b_1 et par conséquent la création du couple moteur magnétique, simultanément attractif et répulsif, provoquant, au moment où l'émission de courant circule dans les bobines EE , le déplacement angulaire du disque denté a . Ce couple est tangentiel aussi longtemps que dure ce déplacement ; il devient radial au moment précis où ce dernier a atteint la valeur d'une demi-division. L'armature ayant dix divisions, soit cinq demi-dents, fait un tour pour dix émissions successives alternativement renversées. L'arrêt du disque-armature est, encore ici, magnétique ; toutefois, l'emploi d'un encliquetage de sûreté est indiqué en raison de la tendance qu'a l'armature, sous l'influence de la masse relativement grande de l'aiguille des minutes et

de sa propre masse, d'osciller, un court instant, de part et d'autre de sa position d'arrêt. Cet encliquetage consiste en un levier *e* en forme d'ancre, travaillant de la manière connue sur deux des dix goupilles dont l'une des faces du disque est munie.

L'aimant permanent se voit en *S*. Un pignon *c* et une roue dentée *d* relient l'axe de l'armature avec la minuterie et ses aiguilles qui sont disposées en avant de la platine principale. La contre-platine *f* supporte les pivots postérieurs des deux axes de l'armature et de la roue intermédiaire *d*. Le pivot antérieur du premier axe, celui que supporte la platine principale, est muni là d'un contre-pivot en pierre dure.

Lorsque le diamètre du cadran secondaire à actionner est très grand, il y a avantage à réduire à trois ou même à deux le nombre des dents de l'armature tournante ; dans ce cas, celle-ci effectue un tour en six (respectivement quatre) minutes, et il faut modifier en conséquence les rapports d'engrenages des roues et pignons conduisant à la minuterie.

Compteur O. Denner. — Le mécanisme de ce compteur, qui est fabriqué par les « Deutsche Telephonwerken » de Berlin et dont la figure 238 donne l'aspect extérieur, comprend : 1° une cage cylindrique fixe constituée par six aimants permanents droits qui sont disposés circulairement sur une pla-

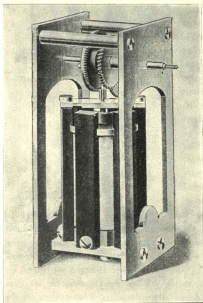


Fig. 238

que de base en laiton et dont les extrémités présentent des pôles nord et sud alternés deux à deux ; 2° une bobine, également fixe, dont le noyau en fer doux est percé sur toute sa longueur et laisse

passer un axe vertical. Ce dernier porte, à la hauteur des extrémités supérieures des six aimants droits, une armature en fer doux ayant trois branches à courbures légèrement excentrées par rapport à l'axe vertical mentionné ci-dessus.

Lorsqu'une émission de courant de sens convenable circule dans la bobine fixe, trois des pôles alternés des aimants droits (ceux qui ont

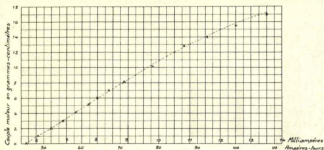


Fig. 239

le même nom) s'affaiblissent, les trois autres au contraire se renforcent, et ce déséquilibre magnétique momentané a pour effet de faire tourner, d'un sixième de tour, l'armature à trois branches. Un pignon, calé sur l'axe vertical au-dessus de son point de pivotement supérieur, est relié à la minuterie par l'intermédiaire d'une roue à couronne dentée.

La disposition électromagnétique imaginée par le professeur Denner est telle que le couple mécanique qui agit sur l'armature tournante croît proportionnellement à l'intensité du courant (voir la fig. 239 et le livre de M. l'Ingénieur Zacharias).

Nota. — Fidèle à notre principe d'éviter toute surcharge inutile et de nous borner à quelques exemples caractéristiques choisis parmi les nombreux mécanismes appartenant à une même catégorie d'appareils, nous renvoyons aux sources spéciales déjà citées ailleurs, entre autres à page 265, ceux de nos lecteurs qui désireraient apprendre à connaître des systèmes de compteurs électrochronométriques appartenant à la classe générale A et différant plus ou moins de ceux qui sont décrits ici.

B. Horloges secondaires à déclenchement électrique.

Généralités. — Nous avons déjà dit quelques mots à page 252 du rôle important que jouent actuellement et joueront probablement de plus en plus les mécanismes *déclancheurs*, et fait voir qu'il faut entendre par là un dispositif, plus ou moins complexe, au moyen duquel une force relativement petite libère, déclanche, une force

relativement grande empruntée à un réservoir quelconque d'énergie tel que la pesanteur, l'électricité d'une pile primaire ou secondaire ou celle d'une machine dynamo, la force expansive d'un gaz, celle d'un ou de plusieurs ressorts, etc.¹

Parmi ces mécanismes, ceux où la force déclanchante est le courant électrique fermé sur un électro-aimant, et la force déclanchée celle de la pesanteur, sont très répandus. Une des formes les plus simples d'un tel déclancheur électromécanique est celle qui est représentée schématiquement dans la figure 240 et à laquelle on a donné le nom de *relais à volet*.

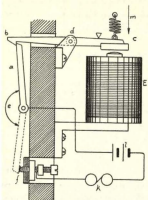


Fig. 240

tombant. Ce relais a été et est encore couramment employé comme indicateur du numéro d'un abonné appelant ou aussi comme signaleur de fin de conversation, dans les tableaux de centrales téléphoniques. Le volet *a*, qui porte au revers le numéro de l'abonné

¹ Ce n'est pas seulement dans le domaine de l'énergie mécanique ou électrique que les dispositifs appelés « déclancheurs » sont devenus intéressants. On a fait usage récemment, et surtout durant la guerre de 1914-1918, de ce qu'on a nommé les *déclancheurs chimiques*. Ce sont des corps jouissant de la curieuse propriété d'amorcer des combinaisons qui, sans eux, ne se produiraient pas. On les a aussi désignés sous le nom de *catalyseurs*. Leur présence, en quantités presque impondérables, provoque, dans certaines conditions données, la formation d'énormes masses de produits chimiques. C'est ainsi qu'on a pu fabriquer en Allemagne les milliers de tonnes d'ammoniaque nécessaires à la production en grand de l'acide nitrique des explosifs ou des engrais, en employant, comme catalyseur, une faible quantité de fer qui change en une attraction irrésistible, la répugnance qu'ont l'un pour l'autre l'azote et l'hydrogène, éléments constitutifs de l'ammoniaque. Ce dernier corps, ainsi fabriqué par voie de catalyse, peut lui-même se combiner avec l'oxygène de l'air au moyen d'un autre corps catalyseur, le platine, qui agit à son tour comme entremetteur. (H. DEMIERRE, dans *La Coopération*, organe des sociétés coopératives suisses de consommation, numéro du 26 mai 1921.)

correspondant, est retenu dans sa position relevée par le crochet b d'un levier d'armature c pivoté en d . On comprend immédiatement qu'une émission de courant, même très brève, lancée dans l'électro-aimant E , fait basculer ce levier, qu'alors le crochet b s'efface et que le volet a tombe, par son poids, dans la position indiquée en pointillé, en parcourant un arc de près de 180 degrés autour de son axe e et en démasquant ainsi le numéro de l'abonné appelant. L'employé téléphoniste que cela concerne remet facilement le relais en état de recevoir un appel ultérieur ; il n'a, pour cela, qu'à relever avec la main le volet a , qui se recroche derrière le crochet b , en faisant basculer le levier d'armature c en sens inverse de celui qui, sous l'influence du courant, avait provoqué la chute de ce volet.

Le relais à volet tombant est souvent complété par un interrupteur électrique f qui, au moyen d'un circuit *elkf* dit *local*, met en action une sonnette électrique trembleuse k destinée à attirer acoustiquement l'attention du téléphoniste, dans le cas où celui-ci n'aurait pas pu assister optiquement à la chute du volet a (sonnette de nuit). On voit qu'alors il y a ici deux forces déclanchées successivement, à savoir : 1^o la pesanteur, par le poids du volet tombant, et 2^o l'électricité, par la circulation, dans la trembleuse k , du courant de la pile l . Lorsque la force déclanchante est, comme dans le cas 2^o ci-dessus, de même nature que la force déclanchée, le dispositif déclancheur prend souvent le nom de *relais* et plus spécialement celui de *relais électrique* lorsque la force déclanchante et la force déclanchée sont toutes deux l'électricité.

Le dispositif déclancheur de la figure 240 pourrait être appelé *relais électro-mécanique*, si l'on y faisait abstraction du contact f et que l'on ne considérât que la chute du volet a .

Si, au lieu de provoquer électriquement le déplacement du levier à crochet bc , on le fait basculer en pressant, avec le doigt, sur son extrémité droite dans le sens de la flèche m , ou en laissant tomber au même endroit un corps pesant quelconque, on pourra désigner le dispositif déclancheur correspondant par l'expression de *relais mécanique*. Enfin, si la force déclanchante est un corps tombant, ou une pression du doigt, ou toute autre force mécanique, et la force déclanchée, l'électricité, on pourra donner au dispositif déclancheur le nom de *relais mécano-électrique*.

A page 252, nous avons vu que l'on peut organiser en *séries* un certain nombre de dispositifs déclancheurs dont chacun, déclanché par le précédent, peut déclancher à son tour un troisième dispositif, ce dernier un quatrième, et ainsi de suite à l'infini.

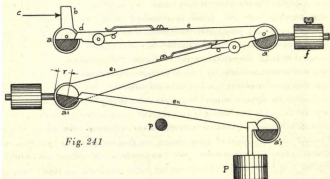
Il va de soi que l'on peut, dans une même série, intercaler des relais mécaniques seulement, ou des relais électro-mécaniques exclusivement, ou enfin des relais mécano-électriques à l'exclusion d'autres.

Mais on peut aussi mélanger dans une seule et même série des relais d'espèces différentes.

On voit dès lors comment s'explique, au moyen de quelques considérations fondamentales relativement simples, l'immense variété des combinaisons mécaniques et électro-mécaniques déjà inventées et appliquées jusqu'ici, et surtout combien est vaste le nombre de ces combinaisons encore applicables dans l'avenir. Il ne sera pas inutile de donner quelques exemples de séries de déclancheurs intéressantes.

1^o Supposons, tout d'abord, qu'il s'agisse de résoudre le problème suivant: libérer, instantanément ou presque, un poids relativement lourd au moyen d'une force déclanchante de quelques grammes appliquée mécaniquement à l'entrée du dispositif déclancheur.

Solution. — Dans la figure 241 ci-dessous, un arbre cylindrique en acier *a* pouvant tourner autour de son axe de figure *o*, lorsqu'on exerce sur le levier *b*, solidaire avec lui, une légère pression dans le sens de la flèche *c*, est entaillé de telle façon que l'extrémité *d* d'un



long levier *e* est retenue tout juste par le bord trempé, poli et lubrifié de cette entaille. La pression à exercer en *c* pour faire tourner l'arbre *a* jusqu'à ce que le bec du levier *e* cesse d'être soutenu et échappe en tombant, peut être extrêmement faible, puisqu'elle n'a à vaincre que la résistance de frottement de deux petites surfaces glissant presque parallèlement l'une sur l'autre, celle du bord de l'entaille et celle du

bec d . Il est vrai que cette résistance est proportionnelle au poids plus ou moins grand du long levier e , mais ce poids peut être partiellement équilibré par un contrepoids f agissant de l'autre côté de l'axe a' de ce levier.

L'arbre a' peut lui-même recevoir une disposition identique à celle de l'arbre a et soutenir à son tour, non loin de son axe de figure o' , le bec d'un second levier e_1 ayant son axe en a_1 , vis-à-vis de a . Un certain nombre de longs leviers, tels que e , e_1 , etc., e_n , pourront ainsi être juxtaposés et chacun d'eux provoquer, en tombant, les déplacements angulaires de deux séries d'arbres tels que a , a' , a_1 , a'_1 , etc., chacun de ces déplacements provoquant à son tour la chute du levier e dont le bec est retenu par le bord de l'entaille de l'arbre a suivant.

Si la distance qui sépare les deux séries, gauche et droite, des arbres entaillés a , est telle que la longueur de chaque levier e soit, par exemple, dix fois plus grande que le rayon r de chaque arbre entaillé, on aura un rapport de démultiplication de 10 par levier e , et s'il y a trois de ces leviers en action, on pourra suspendre, au bord de l'entaille du quatrième arbre, une masse pesante P qui pourra être $10 \times 10 \times 10 = 1000$ fois plus forte en poids que la pression exercée par le bec du premier levier e sur le bord du premier axe a , et alors cette masse pourra être libérée, déclanchée, par la force très petite qui est nécessaire en c pour faire glisser l'une sur l'autre les deux surfaces trempées, polies et lubrifiées du bec de e et du bord de l'entaille de a .¹

Les déplacements angulaires des arbres a qui provoquent successivement la chute des leviers e , étant petits, la course de ces derniers pourra être limitée par des butoirs d'arrêt individuels convenablement placés au-dessous de chacun d'eux, ou même par un seul butoir collectif tel que p .

Rien n'empêche, d'autre part, de mettre sur une même ligne les axes de figure o des arbres a , de manière à constituer deux séries (droite et gauche) de ces arbres ; on diminue ainsi les dimensions d'encombrement du déclancheur. Dans ce cas, tous les leviers e se trouvent, lorsqu'ils sont en position *crochée*, dans un seul et même plan horizontal, et, lorsqu'ils sont en position *décrochée*, dans un seul et même plan incliné. Toutefois cette disposition bout à bout des

¹ Il est presque superflu de rappeler ici que le problème de mécanique appliquée résolu ci-dessus par axes tournants et leviers tombants, est exactement le même que celui que résout un train d'horlogerie par pignons et roues dentées. Tout horloger sait, en effet, qu'il peut, presque sans effort, arrêter avec le doigt le dernier mobile d'un tel rouage et suspendre ainsi la chute du poids, même très lourd, qui l'actionne à l'autre bout de la série des engrenages.

arbres a et parallèle des leviers e , ne dispense pas de proportionner les diamètres des arbres a et de leurs pivots, et aussi les dimensions des leviers e , à la valeur croissante des efforts mécaniques qu'ils ont à supporter.

Les leviers e peuvent, après leur chute, être rétablis dans la position crochée : il suffit, pour cela, de les relever tous, l'un après l'autre, avec la main en commençant par celui qui est le plus éloigné, cinématiquement parlant, de la masse pesante ; celle-ci se recroche en dernier lieu.

Pour que l'extrémité en forme de bec, de chaque levier e puisse passer, sans *coincer*, sur le revers z de l'arbre entaillé a correspondant, on pourra donner à ce bec la disposition articulée représentée dans la figure 242 ci-contre qui se comprend à première vue.

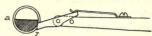


Fig. 242

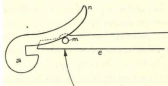


Fig. 243

On peut aussi réaliser le recrochement collectif des leviers e au moyen d'un arbre spécial placé en p (fig. 241) au-dessous d'eux et muni là d'une pièce en forme d'excentrique dont le plan vertical coïncide avec celui du levier e le plus lourd. Une

rotation de l'arbre p (qui sert à la fois de butoir d'arrêt et de recrocheur), produite, soit à la main au moyen d'une manivelle, soit automatiquement au moyen d'un dispositif mécanique déclenché lui-même au moment voulu, opérera le relèvement de tous les leviers e . On pourra, dans ce dernier cas, supprimer les becs articulés de la figure 242 en donnant, à la partie agissante de chaque arbre entaillé a , la forme représentée dans la figure 243 et en munissant en outre l'extrémité en forme de bec du levier e correspondant, d'une goupille latérale m . Cette goupille, au fur et à mesure qu'est relevé le levier e (par le levier e précédent, muni lui-même du dispositif de la figure 243) vient, en pressant de bas en haut sur la surface convenablement incurvée de la queue n solidaire de l'arbre entaillé a , forcer ce dernier à accomplir le léger déplacement angulaire qui permet, d'une part, le recrochement ultérieur du bec de e sur le bord entaillé de a et assure, d'autre part, l'ascension du levier e suivant, dont a est l'axe. Au moment où la partie saillante de l'excentrique de l'arbre p

cesse de pousser, de bas en haut, le levier e sur lequel elle travaille, et l'abandonne ainsi à son poids, tous les leviers e viennent, par un petit déplacement inverse (dirigé de haut en bas), se poser doucement sur les bords des deux séries d'arbres a , et alors, le dispositif est prêt à subir un déclanchement ultérieur.

2^o Série de déclancheurs en partie électriques et en partie mécaniques. — Lorsque c'est le poids moteur du mouvement des aiguilles d'une horloge de clocher qu'il s'agit de déclancher, c'est l'un (ou s'il le faut plusieurs) des arbres à pivots de ce mouvement qui joue le rôle de l'arbre spécial p de la figure 241 et recroche automatiquement les leviers tombants; ce recrochement s'effectue avant la fin de la période de temps (ordinairement quelques secondes par minute), pendant laquelle le train d'horlogerie actionnant les aiguilles, se déroule sous l'influence du poids-moteur libéré. On voit d'ailleurs que la présence de ce rouage rend superflu l'emploi de plusieurs des leviers e de la figure 241, ceux-ci étant avantageusement remplacés, au point de vue démultiplicateur, par les rayons des pignons e' roues dentées (voir la note du bas de la page 331).

Si la force déclanchante de l'horloge de tour en cause est, comme c'est presque toujours le cas dans un système généralisé d'unification électrique de l'heure, une courte et faible émission de courant agissant sur un électro-aimant à armature polarisée ou non, cette force n'a à vaincre que la résistance mécanique très petite que lui oppose la pression, contre son doigt d'arrêt, du *volant* qui règle la vitesse de déroulement du train d'horlogerie, lorsque celui-ci a été déclanché par l'effacement électromagnétique plus ou moins direct, de ce doigt.

3^o Dans la série 2^o ci-dessus, ce sont les déclancheurs mécaniques qui sont prépondérants en nombre, autrement dit, c'est une seule force électrique déclanchante, qui libère une série de plusieurs relais mécaniques ayant la forme de leviers tombants ou d'engrenages tournants. Or, dans la pratique, le problème de l'horloge de tour est plus compliqué. Il ne suffit pas, en effet, qu'une telle horloge soit réglée ou remise à l'heure électriquement par son horloge-mère, il faut encore qu'elle remonte elle-même (automatiquement) les divers poids moteurs qui l'actionnent. Or, ce remontage automatique peut, comme nous le savons, être effectué avec un plein succès, au moyen de moteurs électriques branchés sur les fils urbains de distribution de force ou de lumière. De là la nécessité

d'employer, à côté des déclancheurs de la série 2^o, d'autres déclancheurs, en partie mécaniques, en partie électriques, qui, sous forme d'interrupteurs (fermés aux moments voulus par des leviers tombants) et de moteurs rotatifs plus ou moins puissants chargés de remonter les poids moteurs, assurent la parfaite automaticité de marche de l'horloge de tour. Nous ne reviendrons pas sur cette question déjà élucidée ailleurs (voir en particulier à page 213).

4^o Enfin, il arrive souvent qu'une horloge de tour qui, dans la série 3^o ci-dessus, est exclusivement réceptrice, doive être en plus équipée en horloge-mère capable d'actionner un certain nombre d'horloges secondaires ayant, le plus souvent, la forme de compteurs électrochronométriques. Nous traiterons ce cas particulier dans un chapitre prochain consacré aux horloges-mères. Qu'il nous suffise de constater ici qu'un tel poste d'horloge de tour, en même temps récepteur et transmetteur, devient lui-même et tout entier un poste-relais mécano-électrique, d'une complexité relativement grande, puisqu'il nécessite la présence d'une source de courant autre que celle de l'horloge-mère centrale.

Les généralités exposées ci-dessus à propos du paragraphe B des horloges secondaires à déclanchements électriques, nous autoriseront à passer rapidement en revue les quelques applications de cette catégorie qui ont été faites en électrochronométrie.

Horloges électriques secondaires à mouvements d'horlogerie.

— Dans les horloges de cette catégorie, le déroulement lent du train d'horlogerie, sous l'influence de son poids ou de son ressort moteur, au lieu d'être réglé par les oscillations d'un balancier (pendulaire ou annulaire), l'est par les mouvements en va et vient d'une armature d'électro-aimant agissant sur une roue d'échappement spéciale calée sur l'un des derniers mobiles du train d'engrenages.

Le type le plus courant d'un mécanisme de cette espèce est le « télégraphe à cadran de Breguet », dont la figure 244 donne une représentation schématique. L'axe *A* du levier d'une armature oscillante à faible course, est muni de deux palettes *PP'* qui, au fur et à mesure qu'elles vont et viennent laissent successivement *échapper* les dents *d*, *d*₁, *d*₂, .. *d*_{*n*}, de la roue d'échappement *F*. Celle-ci transmet, de la manière connue, ce mouvement rotatif saccadé à la minuterie et aux aiguilles de l'horloge secondaire. Si la roue *F* a 30 dents, elle fera un tour pour 60 émissions de courant envoyées par l'horloge-mère. Selon que la fréquence de ces émissions sera de 60 par seconde, ou par minute, ou par heure, etc., l'aiguille la plus ra-

pide de la minuterie indiquera le soixantième de seconde, ou la seconde, ou la minute, ou toute autre division de temps plus petite ou plus grande que celles mentionnées ci-dessus.¹

Les horloges électriques secondaires à mouvement d'horlogerie doivent être remontées lorsque le poids ou le ressort qui les actionne

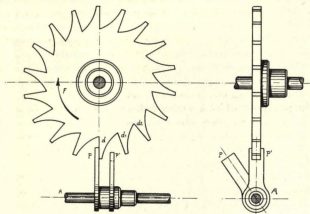


Fig. 244

est arrivé à fin de course. Il est clair que si ce remontage doit être fait à la main pour chaque horloge individuellement, comme cela a été le cas, à l'origine, dans certaines installations d'unification d'heure basées, partiellement ou totalement, sur un système de cette espèce, il en résulterait, pour peu que le nombre des cadrans ainsi unifiés ait une certaine importance, des frais d'exploitation beaucoup trop élevés. Ceux-ci, à vrai dire, pourraient être considérablement réduits, en organisant les mouvements d'horlogerie de telle manière que les périodes de remontage soient très espacées. Il serait facile, en effet, pour peu que les diamètres de cadrans ne dépassent pas la grandeur courante de 20 ou 25 cm., d'obtenir que leurs durées de marche atteignent, pour un seul remontage et surtout là où il ne s'agit que d'indiquer la minute et l'heure, 8, 15, 30 et même 90 jours.

¹ Une horloge électrique secondaire ou indépendante du type du télégraphe à cadran de Breguet, permet, entre autres, de totaliser de très petites fractions de seconde et peut être employée comme « Chronoscope ».

Toutefois, l'électromécanique moderne ne se contente plus de solutions aussi primitives ; elle cherche à se rapprocher, de plus en plus, de la solution idéale qui est l'automatisme parfaite. C'est pourquoi les systèmes d'unification d'heure dans lesquels les horloges secondaires sont toutes à déclenchement électrique, ont été fort peu appliqués. Ces dernières ne se retrouvent plus aujourd'hui qu'à l'état sporadique et mêlées à un grand nombre d'horloges secondaires absolument automatiques, telles que les compteurs électrochronométriques ; mais alors, elles sont presque toujours munies d'un remontage électrique automatique déclenché soit individuellement par le mécanisme même de l'horloge secondaire en cause, soit collectivement depuis la station centrale d'unification d'heure.

Horloge de clocher à déclenchement électrique. — Lorsque dans un système d'unification électrique de l'heure par compteurs électrochronométriques, les dimensions des mécanismes secondaires dépassent certaines limites, ou lorsque ceux-ci doivent non seulement indiquer les heures sur un ou plusieurs cadrans, mais encore les sonner sur des cloches plus ou moins pesantes, les émissions de courant lancées à chaque minute (ou à chaque demi-minute) par l'horloge-mère, n'ont plus à elles seules la force de les actionner directement. Dans ce cas, la meilleure solution du problème consiste à équiper le clocher d'une horloge mécanique, telle que celles dont de nombreux fabricants d'horlogerie de gros volume se sont fait une spécialité et qui possèdent un, deux, trois, etc., corps de rouages, selon qu'il s'agit de mouvoir seulement les aiguilles ou de sonner en plus les heures et demi-heures ou enfin de sonner les heures et tous les quarts d'heure intermédiaires.

Celui de ces corps de rouages qui actionne les aiguilles doit alors être muni, non pas d'un balancier et d'un échappement à ancre ou à cheville, mais d'une *détente électromagnétique* reliée comme un simple compteur électrochronométrique avec l'horloge-mère. Chaque émission de celle-ci déclenche le rouage qui fait parcourir aux aiguilles une division du cadran, puis s'arrête automatiquement ; à l'émission suivante, le même jeu se reproduit, et ainsi de suite de déclenchement en déclenchement. Le déplacement des aiguilles a lieu non pas brusquement et d'un seul coup bref, comme chez les compteurs électrochronométriques, ni lentement et continuellement, à raison d'un soixantième de tour de la roue d'échappement, comme dans une horloge purement mécanique avec balancier battant par

exemple la seconde, mais bien en une fraction de minute, dont la durée dépend du volant à ailettes réglables que l'on monte sur un mobile spécial du train d'engrenages effectuant un certain nombre de tours, toujours le même, à chaque déclenchement. Les aiguilles sont ainsi animées de mouvements intermittents alternant avec des temps de repos plus longs. Il va de soi que, d'autre part, il n'y a rien à changer aux dispositifs bien connus au moyen desquels

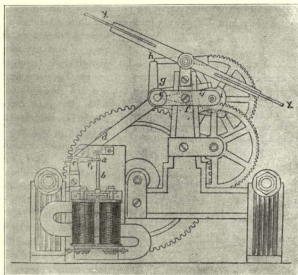


Fig. 245

les autres corps de rouages sonnant les heures et les quarts d'heure sont déclenchés mécaniquement aux moments voulus.

La figure 245 représente un corps de rouage à poids qui est capable d'actionner les aiguilles (non-protégées) d'une forte horloge de tour et qui est muni d'une détente électrique à armature polarisée de Hipp.

Sur l'axe *b* de cette détente se trouve un disque demi-circulaire *a* sur lequel repose l'un ou l'autre des bras articulés d'un levier double *c*₁ (fig. 246) mobile autour d'un axe à pivots *c*. Ce même levier *c*₁ retient par une saillie *x* de forme convenable un long bras *d* (fig. 245)

mobile autour de l'axe e ; celui-ci porte un second bras f sur lequel repose en f et par l'intermédiaire d'une goupille latérale, un levier g à deux bras qui tourne à frottement doux sur l'axe e , et dont la branche verticale retient le doigt h calé sur l'axe du volant XX .

Lorsqu'un courant de sens convenable excite l'électro-aimant de la détente, l'armature de ce dernier se déplace d'un noyau à l'autre et fait tourner l'axe b et avec lui le disque demi-circulaire a ; celui-ci laisse tomber le levier double c_1 (fig. 246) et le bras d (fig. 245) ; le levier en équerre g , poussé par le bras f , laisse échapper le doigt h ; le volant XX et avec lui le rouage du mouvement d'hor-

logerie, entrent en rotation et font avancer les aiguilles de la quantité voulue. La chute du bras d a fait sortir d'une entaille pratiquée dans le disque i , l'extrémité repliée de la branche horizontale du levier double g qui glisse alors sur la périphérie de ce disque et est ainsi empêchée de revenir à la position où il arrête le doigt h . Une goupille v , placée latéralement sur ce même disque i vient, au bout d'un certain temps, presser sur l'extrémité du bras f et

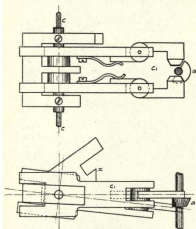


Fig. 246

recrocher ainsi le bras d sur la saillie x du levier double articulé c_1 , et ce dernier (par l'intermédiaire de l'autre de ces bras) sur l'autre bord du disque semi-circulaire a . Après un tour entier du disque i , l'entaille se présente devant l'extrémité du levier g ; celui-ci y tombe et sa branche verticale arrête le doigt du volant. Pour une nouvelle émission du courant, les mêmes effets se répètent et les aiguilles parcourent successivement toutes les divisions du ou des cadrans.

L'une des plus grandes horloges de clocher du continent, celle de la tour de Saint-Pierre à Zurich, a été munie en 1880 par l'auteur, alors ingénieur de Hipp, d'une détente analogue en principe à celle de la figure 246. Intercalée dans le réseau des horloges électriques

de la ville, elle marche avec la même quantité de courant que celle que reçoit chacun des plus petits compteurs électrochronométriques publics. Ses quatre paires d'aiguilles pèsent ensemble 14 quintaux, et le diamètre de chaque cadran est de 10 mètres.

On peut aussi employer, pour produire le déclenchement d'horloges à poids, des électro-aimants à armatures plates, avec ressorts antagonistes ; c'est ce qu'ont fait divers constructeurs, tels que Gondolo, Kaiser, Laguerenne, etc. ; Laguerenne a même muni ses horloges à déclenchement d'un électro-aimant spécial qui remonte automatiquement le poids moteur pendant les soixante secondes qui séparent deux déclenchements successifs (voir les *Applications de l'Électricité* de Du MONCEL, Tome IV). Il y a lieu de rappeler ici que l'emploi d'armatures polarisées est toujours préférable à celui d'armatures obéissant à des émissions de courant toujours de même sens.

C. Horloges électriques secondaires dans lesquelles le courant de l'horloge-mère agit comme correcteur.

C₁. Remise à l'heure.

Dans les systèmes dits de remise à l'heure, le courant électrique envoyé par l'horloge-mère n'intervient qu'à des intervalles relativement longs pour remettre à l'heure les horloges secondaires, celles-ci conservant leur moteur spécial (poids, ressort, électro-aimant etc.) et leur balancier régulateur.

Ce courant n'agissant alors que comme force correctrice et non plus comme moteur, l'indépendance des cadrans secondaires vis-à-vis de l'horloge-mère est plus grande que dans les systèmes d'unification par compteurs électrochronométriques. C'est là certainement un avantage ; en effet, si une ou plusieurs émissions du courant correcteur viennent à faire défaut, il n'en résulte pas un arrêt, ni même une très forte variation des cadrans secondaires ; ceux-ci continuent à indiquer l'heure (il est vrai, avec une moindre exactitude) jusqu'à ce que le surveillant du réseau ait diagnostiqué et écarté le défaut, cause de cette perturbation momentanée. D'un autre côté, la complexité de mécanismes munis d'un échappement, d'un régulateur et d'autres organes délicats (par exemple de ceux destinés à remonter automatiquement le poids ou le ressort

moteur), constitue un grave inconvénient qui les rend impropres à la distribution publique de l'heure par cadrons extérieurs, et qui contribue même à compromettre pratiquement le succès d'une application généralisée de la remise à l'heure à de nombreuses horloges secondaires *intérieures*.

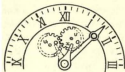


Fig. 247

l'horloge à régler, soit sur son échappement, soit sur son balancier.

Voici comment Breguet effectuait la correction par les aiguilles : l'axe de l'aiguille des minutes est, derrière le cadran, pourvu d'un bras x (fig. 247) qui tourne avec lui. Ce bras peut être saisi par les goupilles de deux roues u, u_1 , engrenant l'une avec l'autre et entrant en mouvement lorsque le rouage indépendant (Breguet employait le mécanisme de la sonnerie) qui les commande, est déclenché par l'électro-aimant correcteur. Cette opération a pour résultat d'amener le bras x , et par suite l'aiguille des minutes, exactement sur la partie

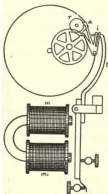


Fig. 248

du cadran correspondant à l'heure à laquelle se produit l'émission du courant venant de l'horloge-mère. La figure 248 indique la disposition de l'électro-aimant correcteur mm_1 , et celle des leviers t, i, a , chargés d'arrêter ou de libérer le dernier mobile r du rouage actionnant les roues correctrices u et u_1 de la figure 247.

Dans l'un des systèmes de Colin-Wagner, l'horloge à régler a la tendance d'avancer sur l'horloge-mère. Sur l'axe de l'aiguille des minutes est calé un limaçon D (fig. 249), sur la périphérie duquel frotte continuellement le levier b ; lorsque celui-ci est sur la partie saillante du limaçon, il est en contact avec un second levier a , ensorte qu'un courant venant de l'horloge-mère par la ligne L , passe directement dans la terre par $L a b$, sans entrer dans l'électro-aimant M . Mais au moment où le levier b tombe dans l'entaille du li-

maçon, c'est-à-dire au moment où l'aiguille des minutes de l'horloge à régler atteint le midi du cadran, il quitte le levier *a* et entre en contact avec le levier *c*. Le courant venant de *L* est alors obligé de passer par l'électro-aimant *M* en suivant le chemin *L M c b* Terre. *M*, devenant actif, attire son armature, et produit, par l'intermédiaire du long levier *h*, l'arrêt de la roue d'échappement *R*. Le pendule de l'horloge (non représenté dans la figure) oscille à *vide* (c'est-à-dire sans que la roue *R* échappe), jusqu'à ce que le courant de la ligne ait été interrompu par l'horloge régulatrice. Lors de cette interruption, qui a lieu au moment où l'aiguille de cette horloge arrive à son tour au midi du cadran, le levier *h* rend sa liberté à la roue *R*, et le mouvement des aiguilles de l'horloge réglée recommence comme auparavant.

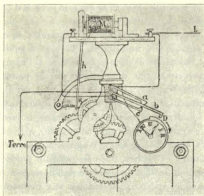


Fig. 249

Pour éviter l'inconvénient de l'avance à donner aux horloges réglées sur l'horloge régulatrice, Colin a imaginé un système de remise à l'heure pour les retards lequel, combiné avec celui que nous venons de décrire, permet de corriger les écarts dans les deux sens. Il arrive à ce résultat en déplaçant longitudinalement, au moyen d'un électro-aimant spécial, l'axe de la fourchette d'échappement, opération qui a pour effet de laisser défiler la roue d'échappement jusqu'à ce qu'une des chevilles de cette roue, plus longue que les autres, vienne buter contre l'une des palettes de la fourchette ainsi écartée, et amène l'aiguille au midi du cadran ; dès lors, cette aiguille se trouve arrêtée jusqu'à ce que l'horloge régulatrice, en coupant le courant correcteur, ait permis à la fourchette de reprendre sa position normale.

Fénon et Garnier obtiennent la remise à l'heure, qu'il y ait avance ou qu'il y ait retard de l'horloge réglée, en faisant la roue d'échappement mobile sur son axe dans le sens longitudinal ; l'électro-aimant correcteur, en devenant actif, dégage cette roue de l'ancre et la laisse

défiler jusqu'à ce qu'elle vienne buter, par l'intermédiaire d'une goupille, sur un arrêt dont la position correspond à celle où l'aiguille des minutes est au midi du cadran. La roue d'échappement conserve cette position jusqu'à ce que l'horloge régulatrice, en coupant le courant correcteur, la rende à l'action de l'ancre. La fermeture du courant se produit toujours trente secondes avant l'heure, en sorte que si l'horloge à régler est en avance ou en retard de dix secondes par exemple, le dégagement de la roue d'échappement, et par suite la remise à l'heure, se manifestera vingt ou quarante secondes avant l'heure, mais l'aiguille ne reprendra sa marche qu'au moment où l'aiguille des minutes de l'horloge régulatrice aura dépassé l'heure.

Parmi les systèmes de remise à l'heure dans lesquels le courant correcteur agit directement sur le pendule, mentionnons celui de Colin-Wagner, où le pendule, réglé sur l'avance, est arrêté par son extrémité au moyen d'un électro-aimant, jusqu'à ce que l'horloge régulatrice, en coupant le courant, le laisse repartir à l'heure juste. Ce système a été appliqué en 1880, à Dresde, par le Dr Uldricht, qui l'a emprunté à Colin-Wagner. Mentionnons encore les dispositifs de Tresca et Redier, dans lesquels un poids curseur pouvant glisser le long de la tige du pendule de l'horloge à régler, est déplacé par deux rouages spéciaux, déclanchés aux moments voulus par deux électro-aimants en relation avec l'horloge régulatrice.

D'autres systèmes de remise à l'heure, plus ou moins parents de ceux que nous venons de passer en revue, et dans le détail desquels nous ne pouvons entrer, ont été combinés par MM. Bain, Lasseau en France, Barraud et Lund en Angleterre, Siemens et Halske en Allemagne, Hipp en Suisse. On en trouvera la description dans les ouvrages déjà cités de Du Moncel, Tobler et Merling.

C₂. Synchronisation des pendules.

Lorsque les émissions du courant correcteur envoyées par l'horloge-mère se produisent à intervalles rapprochés et réagissent directement sur les pendules des horloges secondaires, ceux-ci, influencés à chaque oscillation (ou multiple convenable d'une oscillation), battent synchroniquement avec le pendule de l'horloge-mère. Tel est le principe qui est à la base des systèmes proposés et partiellement réalisés par Foucault en 1847, Vérité en 1863, Jone de Glasgow en 1865, Breguet en 1879, Favarger en 1880, etc.

Voici en quelques mots, la disposition très simple des différents organes d'un tel système :

Le pendule *A* de l'horloge directrice (fig. 250), est pourvu d'un interrupteur *I*, qui ferme à chaque oscillation le courant de la pile *P* sur des électro-aimants *b*, *b'*..., placés au-dessous des pendules *B*, *B'*... des horloges secondaires. Ces électro-aimants, rendus actifs pendant tout le temps que dure l'émission du courant correcteur, influencent les armatures *c*, *c'*..., adaptées aux extrémités inférieures des pendules

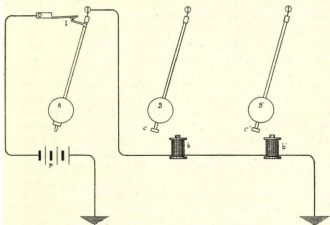


Fig. 250

B, *B'*... Si la durée et l'instant de l'émission sont convenablement réglés, les positions des électro-aimants par rapport aux points de suspension des pendules secondaires, bien choisies, tous les pendules sont rendus solidaires de celui de l'horloge-mère et battent synchroniquement avec lui.

Vérité emploie pour chaque horloge secondaire un seul électro-aimant. Dans le système *Breguet*, par contre, deux électro-aimants agissent alternativement sur l'armature de chaque pendule à régler et cela aux moments où ce dernier atteint ses écarts extrêmes. Certains expérimentateurs disent avoir constaté qu'il est bon, pour assurer la stabilité du synchronisme, que les pendules réglés aient la tendance d'avancer légèrement sur le pendule réglant. Mais on arrive aujourd'hui à corriger électromagnétiquement aussi bien le retard

que l'avance des horloges secondaires synchronisées, et alors celles-ci, réglées aussi exactement que possible en l'absence du courant synchronisateur, ont une marche excellente, même lorsque, pour une raison ou pour une autre, la circulation de ce courant, après un certain temps de bon fonctionnement, se trouve momentanément arrêtée.

Les systèmes de synchronisation ont, sur ceux de remise à l'heure, l'avantage de distribuer l'heure avec une grande précision. Par contre, dans la plupart des installations de cette espèce réalisées dans certaines villes telles que Paris, Berlin, Londres, etc., où les émissions lancées par l'horloge directrice ont lieu toutes les secondes ou toutes les deux secondes, la pile fournissant le courant de synchronisation est mise à contribution dans une large mesure, ce qui peut dans certains cas constituer un inconvénient.

L'auteur de ces lignes a cherché s'il n'était pas possible d'obtenir la synchronisation au moyen d'émissions plus éloignées les unes des autres, et il est arrivé à des résultats très satisfaisants en employant, comme horloges secondaires, des pendules électromagnétiques de Hipp sur lesquelles le courant correcteur n'agissait qu'une seule fois par minute. Il a pu ainsi maintenir d'accord deux pendules dont l'un avait la tendance de retarder de $2\frac{1}{2}$ minutes par vingt-quatre heures sur l'autre. Des piles du type Leclanché sont, dans ce cas, parfaitement suffisantes.

Lorsqu'on donne au courant synchronisateur une certaine intensité, et aux ampères-tours des électro-aimants correcteurs, une certaine valeur-limite, ce courant peut, à lui seul, entretenir le mouvement des horloges secondaires : de correcteur, il devient alors moteur. Liais a construit, d'après ce principe, ses compteurs électrochronométriques à pendules, chez lesquels le courant, mis en action toutes les secondes, maintient en oscillation un balancier pendulaire battant la demi-seconde, et réagissant, au moyen d'un rochet et de cliquets d'impulsion, sur la minuterie de l'horloge.

L'horloge à palette et contre-palette de Hipp, telle qu'elle a été décrite au chapitre II (p. 232) du présent volume, se prête très bien, ainsi qu'on vient de le constater, aux nombreuses applications que l'on fait actuellement du principe de la synchronisation des balanciers pendulaires. L'échappement électrique de Hipp, dont le jeu, on se le rappelle, dépend exclusivement d'une certaine amplitude-limite du balancier oscillant, peut être, ou non, normalement en action, selon que le courant synchronisateur, envoyé par l'horloge directrice, est

ou n'est pas assez intense pour que cette amplitude-limite soit atteinte. Cette dernière est-elle dépassée d'une manière continue, c'est le courant synchronisateur qui entretient, à lui seul, les oscillations des balanciers secondaires, et alors on retombe dans le cas des compteurs électrochronométriques à pendules de Liais. Cette amplitude-limite n'est-elle pas, au contraire, normalement dépassée (courant synchronisateur relativement faible), c'est l'échappement électrique de Hipp et, par son intermédiaire, la pile locale, qui entretient les oscillations du pendule secondaire, et alors les émissions venant de l'horloge directrice sont exclusivement correctrices. On comprend dès lors facilement que cet échappement et sa pile locale constituent un *relais électrique*, un *déclancheur*, entrant *automatiquement* en action lorsqu'une perturbation quelconque vient à compromettre la circulation, ou même seulement la constance d'intensité du courant synchronisateur ayant agi jusqu'alors comme moteur.

La maison Favarger & C^{ie} a consacré beaucoup de temps à l'étude serrée et méthodique des meilleures conditions à réaliser pour obtenir des installations simples, pratiques et sûres d'unification d'heure par pendules synchronisées. Bien entendu, dans de telles installations, les cadrans secondaires proprement dits, intérieurs et surtout extérieurs, doivent être exclusivement des compteurs électrochronométriques, seul système qui, nous le savons déjà (p. 280 et suiv.), est capable de satisfaire complètement aux conditions, parfois très dures, d'une distribution généralisée de l'heure publique unifiée. Par contre, les dispositifs bien compris de remise à l'heure et de synchronisation des pendules rendent les plus grands services dans les cas, de plus en plus fréquents, où il s'agit de maintenir à la même heure que celle d'un centre général d'unification, un certain nombre d'*horloges-mères secondaires* dont chacune actionne à son tour de nombreux compteurs électrochronométriques, des horloges de clocher ou n'importe quels autres appareils horaires.

Le principe de la synchronisation à distance d'un certain nombre de balanciers pendulaires, trouve actuellement un grand nombre d'applications très intéressantes. Citons, entre autres, parmi les installations de ce genre réalisées récemment par la maison Favarger & C^{ie}, celle au moyen de laquelle a été résolu le difficile problème de l'unification de l'heure, exacte à une très petite fraction de seconde près, des appareils enregistreurs qui, répartis tout le long d'une ou même de plusieurs lignes de chemins de fer à traction électrique,

tracent automatiquement et d'une manière continue les courbes de variation de la consommation d'énergie électrique, afférentes à chaque tronçon de ligne du fait des trains plus ou moins nombreux qui s'y trouvent arrêtés ou en marche normale, accélérée ou ralentie. ¹

¹ La discussion mathématique des conditions de fonctionnement de quelques systèmes de synchronisation d'horloges (avec ou sans amortissement, avec ou sans échappement mécanique, etc.), a été faite par divers savants parmi lesquels il faut citer : Poisson, Foucault, Helmholtz, Lord Rayleigh, Cornu, Andrade, Bouasse. Consulter entre autres le mémoire que Foucault publia en 1847, — la reproduction imprimée d'une conférence que Cornu fit, devant la Société internationale des électriciens, le 24 janvier 1894, — une étude de Jules Andrade intitulée : *La théorie de la synchronisation des horloges* et publiée en 1904 dans les *Archives des sciences physiques et naturelles* de Genève, — et surtout *Pendule, Spiral, Diapason* de Bouasse (Paris 1920).

Horloges-mères.

Généralités. — Nous avons fait connaître, au chapitre III, les conditions auxquelles doivent satisfaire les organes fondamentaux d'un système d'unification de l'heure par l'électricité. Nous avons successivement analysé les fonctions du générateur de courant, des récepteurs, des conducteurs et de l'interrupteur. A propos de ce dernier organe, qui exerce une influence prépondérante sur la bonne marche d'une telle installation, nous avons indiqué quelles sont les précautions essentielles à prendre en construisant et en exécutant l'horloge-mère où il a son siège. Nous compléterons ces indications par la description de quelques types d'horloges-mères ayant donné de bons résultats pratiques.

Parmi ces types, ceux qui ont été imaginés, étudiés et réalisés par Hipp, puis perfectionnés par ses successeurs, continuent à jouer un rôle de premier plan. Ils sont tous basés sur l'emploi exclusif d'émissions de courant alternativement renversées ; ils nécessitent ainsi, outre la présence de l'interrupteur proprement dit, celle d'un renverseur de courant.

Le principe des courants alternés, que Hipp a été le premier à appliquer en grand parce que seul, nous l'avons déjà vu, il permet d'assurer pleinement la distribution de l'heure au moyen de cadrans extérieurs publics, but que cet inventeur s'était proposé dès le début, — ce principe, disons-nous, a été adopté, après Hipp, par tous les constructeurs de quelque notoriété, qui se sont occupés d'horlogerie électrique et qui, d'abord en Allemagne et plus récemment en France, ont réussi à installer et à maintenir en marche continue et satisfaisante des réseaux d'unification d'heure de quelque importance.

On peut diviser en deux catégories principales les horloges-mères de Hipp selon que celles-ci sont des pendules électriques indépendantes ou des pendules purement mécaniques. Les premières sont du type à palette et à contre-palette décrit à pages 232 et suivantes. Les secon-

des sont du type à déclanchement mécanique qui a déjà été mentionné à la page 290 et dans lequel le mouvement d'horlogerie spécial qui porte les contacts à renversement de courant est indépendant du mécanisme à échappement Graham (ou à chevilles) de l'horloge-mère proprement dite, et n'est mis en action (déclanché) par cette dernière qu'au moment très court et très précis (ordinairement lorsque l'aiguille des secondes de cette horloge atteint le zéro de son cadran), où l'appareil à contacts doit commencer à lancer ses émissions dans les cadrans secondaires.

Avant d'entrer dans le détail de ces divers mécanismes, il est nécessaire de donner ici quelques indications préliminaires sur un autre principe, très important aussi, que Hipp a adopté dès le début, à savoir le *fractionnement* en plusieurs groupes de toutes les horloges secondaires dépendant d'une seule et même horloge-mère.

La nécessité de ce fractionnement découle de la quasi-impossibilité où l'on se trouve actuellement et où l'on se trouvera sans doute longtemps encore, d'augmenter indéfiniment l'intensité du courant que l'on peut faire passer par un seul et même interrupteur, sans risquer d'influencer trop défavorablement la marche de l'horloge-mère chargée de le fermer à chaque minute ou à chaque demi-minute.

Supposons, par exemple, qu'il s'agisse d'unifier l'heure montrée par 500 compteurs électrochronométriques de Hipp ou de Favarger, lesquels, intercalés selon le système de la dérivation pure (v. p. 277), auraient chacun une résistance d'électro-aimant de 150 ohms. L'expérience démontre que chaque compteur doit recevoir, aux bornes, une force électromotrice normale et moyenne de 3,75 volts environ, ce qui correspond, selon la loi d'Ohm, à une intensité de

$$i = \frac{3,75}{150} = 0,025 \text{ ampère.}$$

Si nos 500 compteurs étaient tous attelés en dérivation sur un seul et même interrupteur, l'intensité de courant à laquelle celui-ci devrait livrer un passage sûr serait de

$$500 \times 0,025 = 12,5 \text{ ampères,}$$

en négligeant, pour le moment, la partie de la force du courant qui est absorbée par les fils conducteurs.

Sans doute, dans la technique des courants forts, autrement dit des courants tels qu'on les emploie dans les installations de lumière ou de force électrique, l'intensité ci-dessus de 12,5 ampères est d'un usage courant. Rien n'empêcherait d'ailleurs de combiner et d'exécuter

un interrupteur robuste, qui, déclenché à chaque minute (ou demi-minute) par le mécanisme très délicat de l'horloge-mère, serait capable de faire sauter à la fois et d'un seul coup, les aiguilles des 500 compteurs en cause. Toutefois, si l'on tient compte des frais d'installation et d'entretien relativement coûteux qu'occasionnerait un tel dispositif, et surtout de la solidarité excessive et parfois dangereuse qu'il établirait entre les organes électromagnétiques d'un aussi grand nombre de cadrans secondaires ainsi branchés sur un seul et même conducteur (à simple ou à double fil) et sur un seul et même interrupteur, on constate, avec Hipp, que la solution la plus économique, la plus rationnelle et la plus sûre du problème, consiste à répartir les 500 compteurs sur plusieurs interrupteurs fermés non plus tous à la fois et d'un seul coup, mais bien *successivement* à une ou au plus deux secondes d'intervalle, par l'appareil à contacts de l'horloge-mère. L'inconvénient que présente cette solution, à savoir un écart de quelques secondes entre l'instant du saut des aiguilles des compteurs dont l'interrupteur est fermé le premier et l'instant du saut correspondant des compteurs dont l'interrupteur est fermé plus tard, est pratiquement négligeable, ainsi que nous allons le démontrer :

Supposons que la construction de l'appareil à contacts de l'horloge-mère soit telle que chacun des interrupteurs de groupes puisse, sans danger, transmettre une intensité de courant maximum de 0,625 ampère ; on pourra atteler en dérivation pure, sur chacun d'eux, 25 compteurs électrochronométriques de Hipp de 150 ohms (car $25 \times 0,025 = 0,625$) et alors nos 500 compteurs seront répartis sur 20 interrupteurs de groupes. En admettant en outre que chacun de ces 20 interrupteurs soit fermé une seconde après le précédent, les 500 paires d'aiguilles des 500 compteurs auront toutes effectué leur saut en 20 secondes, soit en un tiers de minute. L'écart de 20 secondes existant entre le saut des compteurs du premier groupe et le saut des compteurs du dernier groupe de 25 horloges secondaires est, pratiquement, sans conséquence, car dans une installation horaire unifiée où les aiguilles des horloges secondaires progressent sur leurs cadrans par sauts instantanés ayant lieu une fois seulement par minute, il est sans importance que ces sauts aient lieu à l'une plutôt qu'à l'autre des 60 secondes que comprend chaque minute. Cette dernière remarque nous conduirait même à utiliser, pour l'actionnement des interrupteurs de groupes, non pas seulement le tiers de la minute, mais bien la moitié (30 secondes), ou les deux tiers (40 secondes), ou même enfin la totalité (60 secondes). Dans ces divers cas, dont le dernier, qui est

que l'expérience a vérifié comme possible), on pourra travailler à raison de 0,005 ampère (cinq milliampères) en moyenne par cadran, ce qui permettra de charger chaque interrupteur de groupe à raison de $\frac{1,25}{0,005} = 250$ cadrans, et alors les chiffres des capacités de la page 351 peuvent être doublés.

Mais le chiffre de 1,25 ampère, adopté dans ce qui précède comme limite de l'intensité maximum convenant à un interrupteur donné, peut lui-même être augmenté ; il suffira pour cela de donner à cet interrupteur une construction encore plus robuste que celle admise tout à l'heure et telle, par exemple, qu'il soit loisible de porter à 1,5, 2, 2,5, 3, etc. ampères, cette intensité-limite. On augmentera alors dans les proportions de 20, 60, 100, 140, etc. pour cent, les chiffres de capacités donnés en dernier lieu.

Enfin, ainsi que nous aurons l'occasion de le constater en étudiant l'horloge-mère à déclenchement de Hipp, rien n'empêche d'atteler sur une seule et même horloge-mère de ce type *plusieurs appareils à contacts* dont chacun posséderait le nombre maximum d'interrupteurs qui peuvent être fermés successivement dans l'intervalle d'une minute (ou, mieux dit, de deux déclenchements voisins). Si, par exemple, le mode de construction adopté est tel que ce nombre maximum soit de 40 et que l'on ait trois appareils à contacts possédant chacun ses 40 interrupteurs de groupes et son renverseur de courant, chaque déclenchement permettra de faire sauter *successivement* 40 et *simultanément* 3 groupes d'horloges secondaires, soit au total $40 \times 3 = 120$ groupes, et alors, si chacun d'eux comprend 250 cadrans, l'horloge-mère en cause aura une capacité de $120 \times 250 = 30\,000$ cadrans secondaires.

Autant dire tout de suite qu'en fait, la capacité d'une seule et même horloge-mère peut être presque indéfiniment augmentée et que par conséquent et à plus forte raison, *la capacité d'une centrale horaire de distribution électrique de l'heure, qui peut elle-même comprendre plusieurs horloges-mères à pendules synchronisés, est indéfiniment extensible.*

Il ne faut pas oublier, en poussant aussi loin que nous venons de le faire, les conséquences des raisonnements ci-dessus, qu'à chaque interrupteur de groupe correspondent un ou deux fils principaux avec leurs dérivations (un fil seulement, lorsque c'est la terre qui est employée comme chemin de retour des émissions de courant, deux fils lorsque ce chemin est lui-même constitué, pour chaque cadran, par

un second fil identique au premier). Il résulte de là qu'au fur et à mesure qu'on étend et intensifie la zone d'action d'une centrale horaire et que se multiplie ainsi le nombre des cadrans secondaires actionnés par elle, le nombre des fils conducteurs reliant ceux-ci à celle-là augmente proportionnellement. Or, la partie de la dépense de premier établissement et d'entretien annuel qui est le fait du réseau de ces fils est, par rapport à celle qui provient des appareils eux-mêmes (transmetteurs et récepteurs), *considérable*.

Il n'est pas impossible qu'on trouve, d'ici à peu de temps, un moyen peu coûteux à la fois et sûr, de brancher les horloges secondaires d'un réseau horaire sur les fils déjà existants d'un réseau téléphonique public, sans que le fonctionnement des appareils de l'un ou de l'autre des deux systèmes ainsi conjugués en soit le moins du monde perturbé. Il n'est pas impossible non plus qu'en appliquant à l'unification électrique de l'heure des dispositifs semblables ou analogues à ceux qui ont donné de si merveilleux résultats en télégraphie et en téléphonie *sans fil*, on arrive à la suppression plus ou moins complète des fils conducteurs des systèmes horaires déjà expérimentés. Diverses tentatives plus ou moins réussies, et surtout plus ou moins générales, ont déjà été faites dans cette direction et nous aurons plus loin l'occasion d'en parler. Bornons-nous pour le moment, et jusqu'à nouvelle expérience vraiment décisive dans ce domaine, à constater que pas plus que la télégraphie sans fil n'a jusqu'ici supplanté et supprimé la télégraphie ordinaire par fil, l'horlogerie électrique sans fil n'a réussi et ne réussira probablement pas de longtemps à se substituer totalement à l'horlogerie électrique par fils.

Les considérations qui précèdent pourront apparaître à plusieurs de nos lecteurs comme ayant un caractère quelque peu académique, voire utopique. Nous ne les avons exposées que dans l'idée de montrer les amorces de deux ou trois des voies, d'ailleurs divergentes, au long desquelles pourrait tout à coup se produire un progrès réel. Toutefois, le souci de prévoir à coup sûr, ou même seulement de deviner une invention imminente et sensationnelle, ne doit pas préoccuper au point de renier prématurément (et parfois à force d'incompétence ou d'ignorance), les résultats et les progrès déjà acquis au cours de nombreuses années de travail antérieur. Le nouveau, le sensationnel, c'est fort beau, surtout quand il est plein et comme gonflé de conséquences immédiates et certaines, mais l'acquis, l'expérimenté, ce qui a déjà rendu de longs et précieux services, ne doit pas être ignoré, ni méconnu, ni surtout méprisé.

Horloge-mère électrique à palette et à contre-palette de Hipp. — Ce type a, extérieurement, le même aspect que les deux horloges indépendantes qui sont représentées dans les figures 163 et 164 des pages 235 et 236 et dont l'une est munie d'un pendule battant la demi-seconde et l'autre d'un balancier battant la seconde. Le mécanisme intérieur de ces deux appareils est le même. La figure 251 ci-contre en donne la vue de devant. La roue d'échappement *r* qui fait un tour par minute est directement soumise, ainsi que nous l'avons déjà vu à pages 237 et suivantes, aux impulsions mécaniques du balancier. Elle porte un ressort isolé et recourbé *k* dont l'extrémité libre est fendue et garnie de platine et qui, à chaque tour de *r*, autrement dit à chaque minute, vient toucher successivement les doigts isolés 1, 2, 3, 4, etc., disposés en couronne circulaire autour de la périphérie de *r* ; mais, en même temps, la saillie platinée de *k* touche l'arc également platiné (ou recouvert d'une lame d'argent) *l* ; *k* relie ainsi cet arc successivement avec ces doigts isolés. Chacun de

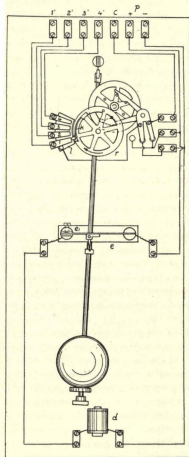


Fig. 251

ceux-ci dessert un groupe d'horloges secondaires, auquel il est relié par l'intermédiaire des bornes de sortie 1', 2', 3', etc., placées au haut de

ceux-ci dessert un groupe d'horloges secondaires, auquel il est relié par l'intermédiaire des bornes de sortie 1', 2', 3', etc., placées au haut de

la planchette de fond portant tout le mécanisme. Les fils de retour du courant sont communs à tous les groupes et aboutissent tous à la borne extérieure marquée *C* ; quant aux deux bornes extérieures marquées $+$ et $-$, elles reçoivent les deux fils venant de la source de courant *P* qui fournit à la fois et le courant des horloges secondaires et celui qui entretient le mouvement oscillatoire du balancier de l'horlogemère (on voit en *e* le contact-interrupteur de l'échappement électrique de Hipp et en *d* l'électro-aimant moteur correspondant).

Le renverseur de courant est constitué par deux ressorts *A* et *B* (fig. 252 et 253) adaptés à un levier *f* mobile autour d'un axe *g* et prolongé de l'autre côté de cet axe par une pièce en forme d'ancre *h* sur les deux bras de laquelle travaillent six goupilles disposées régulièrement sur la roue dentée *r'* faisant un tour en douze minutes, et qu'actionne un pignon *i* calé sur l'axe de la roue d'échappement *r*. Les deux bras de l'ancre *h* sont formés de telle façon que le pas-

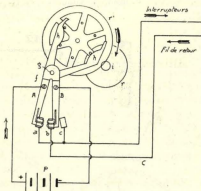


Fig. 252

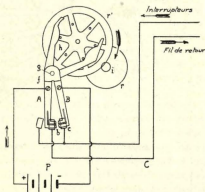


Fig. 253

sage de deux goupilles placées sur un même diamètre de la roue *r'* donnent, peu à peu et successivement, deux positions différentes aux ressorts *A* et *B*, dans l'intervalle de deux minutes consécutives. Dans une de ces positions, ces ressorts sont en contact avec les deux plots

fixes *a* et *b* (fig. 252) ; dans l'autre, ils touchent les deux plots *b* et *c* (fig. 253) (*a* et *c* ne font d'ailleurs qu'un au point de vue conductibilité). Dans le premier cas (fig. 252), le courant positif de la source *P* arrive au plot *a* par le ressort *A*, entre successivement dans les divers groupes de compteurs secondaires, au fur et à mesure des fermetures

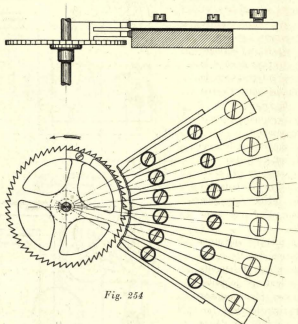


Fig. 254

(à deux secondes d'intervalle) des interrupteurs de groupes, revient par le fil de retour commun *C* au ressort *B* du renverseur et enfin au pôle négatif de *P*. Dans le second cas (fig. 253), ce même courant positif entre dans le plot *b* par le ressort *A*, arrive ensuite aux compteurs par le fil commun de retour *C* et en revient par les interrupteurs de groupes, le plot *c* et le ressort *B*. Comme il s'est écoulé une minute entre les deux changements de position des ressorts *A* et *B*, l'émission de courant reçue par les compteurs à la première minute est de sens inverse de celle reçue par eux à la seconde minute. Les bobines bifilaires évitant les effets nuisibles des extra-courants de

fermeture et d'ouverture des interrupteurs de groupes, sont disposées de la même façon que cela est indiqué sur la figure 191 de la page 285, à savoir en dérivation à l'origine des deux fils principaux de chaque groupe.

La figure 254 donne l'aspect que prend la pièce de contacts des interrupteurs de groupes d'une horloge-mère à palette de Hipp, perfectionnée par ses successeurs, lorsque ces interrupteurs sont au nombre de six. Ce dispositif est, comparé à celui de la figure 81 de la seconde édition française du présent ouvrage qui représentait le dispositif analogue primitivement employé par Hipp, considérablement plus simple, plus robuste et plus sûr que ce dernier. Il donne en conséquence de meilleurs résultats. Chaque interrupteur peut être chargé à raison de 20 à 25 cadrans secondaires, ce qui, pour une horloge-mère à 6 interrupteurs, représente une capacité de 120 à 150 cadrans ayant une résistance d'enroulement de 150 ohms. En portant cette résistance à 500 ou même 1000 ohms, on augmente considérablement cette capacité (p. 351).

Horloges-mères à palette de Hipp à grandes capacités. —

Lorsque, dans celui des deux types d'horloge-mère décrits ci-dessus qui est muni d'un balancier battant la demi-seconde, on supprime la minuterie, les aiguilles, le cadran et tout l'appareil des contacts à minutes, et que l'on ne conserve, du mécanisme, que le balancier oscillant électriquement, ce dernier peut, à lui seul, être utilisé comme horloge-mère capable d'actionner un certain nombre de compteurs électrochronométriques à armatures polarisées de Hipp. Il suffit pour cela que ces compteurs soient organisés de manière à battre, non pas la minute, ni même la seconde, mais bien la *demi-seconde*, chose facile à réaliser par une simple adaptation correspondante des rouages de leur minuterie. Il faut en outre munir la suspension du pendule oscillant d'un contact-renverseur identique en principe à celui à lamelles de Hipp décrit à pages 239 et suivantes. A chaque oscillation simple du balancier, toutes les aiguilles des compteurs qu'on aura reliés à ce contact avanceront d'un saut et battront la demi-seconde, absolument comme battent la seconde, des compteurs reliés par l'intermédiaire du contact de la page 239 avec un balancier oscillant électriquement à raison d'une seconde par demi-période.

Mais la distribution de l'heure électriquement unifiée, faite au moyen de compteurs battant la demi-seconde et la seconde, ne trouve des applications que dans les observatoires, les laboratoires scientifiques et dans certaines industries spéciales. Pour la distribution de

l'heure dite « civile », celle qui règle l'activité générale d'un public nombreux et dispersé, la minute (exceptionnellement la demi-minute) suffit ordinairement à tous les besoins.

Dans ce dernier cas, la possibilité que l'on a de supprimer, dans le mécanisme d'une horloge à palette de Hipp, tout organe qui n'est pas absolument nécessaire soit à l'entretien des oscillations du balancier, soit, en tant qu'il s'agit d'une horloge-mère, à l'actionnement des compteurs (battant la minute) correspondants, conduit à réaliser l'horloge-mère simplifiée à grande capacité que nous allons décrire.

On s'assure facilement, en examinant la figure 251, que l'adaptation, au mécanisme relativement compliqué qu'elle représente, d'une pièce à contacts telle que celle de la figure 254, n'est possible qu'en tant que le nombre des interrupteurs de groupes ne dépasse pas un certain chiffre, que l'expérience a appris ne pouvoir guère être supérieur à 6 ou tout au plus à 8. Ce nombre est en effet limité du fait de la présence de différents autres organes tels que le rouage de la minuterie, le renverseur de courant, etc., qui encombrant déjà le mécanisme. En supprimant, de ces organes, tout ce qui peut être supprimé, en réduisant la place occupée par ceux qu'il faut conserver, on arrive à porter à 20 le nombre des interrupteurs de groupes pou-

vant être fermés successivement, à une seconde d'intervalle, dans l'espace d'une seule et même minute. On peut obtenir ainsi des capacités de 500 cadrans et plus.

La figure 255 représente, vu de devant, le mécanisme d'une telle horloge-mère battant la demi-seconde.

a est la roue d'échappement que fait avancer mécaniquement d'une dent à chaque oscillation double le balancier. Cette roue fait un tour, non pas en une minute, mais bien en deux minutes,

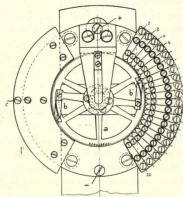


Fig. 255

ce qui permet de supprimer le renverseur de courant de la figure 251 et de le remplacer par le dispositif suivant, beaucoup moins encombrant.

La roue *a* (fig. 255 et 256) porte deux ressorts de contacts isolés

b et b' , qui viennent, chacun à leur tour, toucher successivement les 20 doigts isolés 1, 2, 3, etc., 20, reliés aux 20 groupes 1', 2', 3', etc., 20' des compteurs à minutes et font ainsi sauter (en 20 secondes) leurs aiguilles, l'un sur les minutes paires et l'autre, au demi-tour suivant

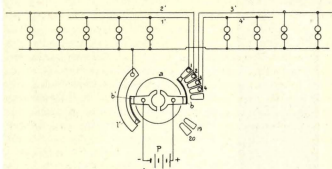


Fig. 256

de a , sur les minutes impaires. Les deux ressorts b et b' sont reliés avec les deux pôles + et - de la source de courant P par l'intermédiaire de deux autres ressorts plats e et f (fig. 257) qui sont continuellement en contact métallique avec les bouts des deux pivots de l'axe horizontal portant la roue d'échappement a . Cet axe est en deux parties isolées l'une de l'autre, ainsi que le montre la figure 257. Dès lors, si l'un des deux ressorts de contact, b par exemple, soit celui qui communique avec P^+ , touche successivement tous les doigts isolés 1, 2, 3, etc., 20, l'autre, b' , celui qui communique avec P^- , touche, pendant tout ce temps, l'arc l' relié lui-même au fil de retour commun des compteurs, et alors le circuit fermé que parcourt l'émission positive du courant est :

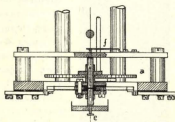


Fig. 257

$P^+ - b -$ successivement 1, 2, 3... 20 — les groupes 1', 2', 3'... 20' (dont elle sort par le bas), l'arc $l' - b' - P^-$.

Or, cette position de b et de b' a lieu pendant l'une des deux demi-révolutions de la roue a et de son axe en deux parties. Pour l'autre demi-révolution, c'est le ressort b' , relié à P^- , qui touche successivement les plots 1, 2, 3... 20 et c'est le ressort b qui relie l'arc l' avec P^+ , et alors l'émission positive parcourt le circuit fermé :

$P^+ - b - l' -$ successivement les groupes 1', 2', 3'... 20' (dont elle sort par le haut), puis 1, 2, 3... 20 — arc $l' - b' - P^-$.

Cette émission est ainsi, dans la partie de ce circuit qui contient les électro-aimants des compteurs, inverse de celle qui a été lancée dans ceux-ci pendant la précédente demi-révolution de a .

Il va de soi que la disposition de l'appareil à contacts qui vient d'être décrite comme convenant aux balanciers à palette de Hipp battant la demi-seconde, est applicable telle quelle aux mêmes balanciers battant la seconde et alors l'horloge-mère correspondante a, extérieurement, l'aspect représenté par la figure 258 ci-contre.

Horloge-mère mécanique à déclanchement de Hipp. — Lorsque le nombre des compteurs électrochronométriques (ou autres horloges secondaires électriques) à actionner d'un seul et même point, atteint dans le présent, ou est destiné à atteindre dans l'avenir, un chiffre variant de 500 à 1000, 2000 (et plus) appareils horaires de toute grandeur et de toute espèce, lorsque, en outre, le réseau ainsi prévu comprend ou comprendra un nombre relativement grand de cadrons publics directement exposés aux intempéries, il est prudent d'adopter, comme horloge-mère centrale et unique d'une telle



Fig. 258

installation, une horloge mécanique à déclanchement, autrement dit un mécanisme dans lequel c'est un mouvement d'horlogerie spécial, à contacts particulièrement robustes, qui lance aux moments

voulus (ordinairement toutes les minutes), dans les horloges secondaires, les émissions de courant alternativement renversées qui doivent les unifier.

Le choix d'un tel type était, du temps de Hipp, conditionné par l'obligation où l'on croyait alors se trouver, d'employer des émissions de courant relativement intenses pouvant aller jusqu'à un ou même un ampère et demi. Or de telles intensités ne peuvent être sûrement transmises que par des interrupteurs très robustes, à fortes pressions mécaniques (p. 283), qu'à l'époque on croyait n'être réalisables qu'au moyen de poids lourds réagissant aussi directement que possible sur les organes mobiles de l'appareil à contacts. Nous verrons plus loin qu'aujourd'hui on peut obtenir des contacts très robustes fermés directement par un pendule électrique oscillant, et qu'en outre il est possible, ainsi que nous l'avons déjà vu à pages 351 et suivantes, de diminuer l'intensité d'une émission de courant sans modifier son wattage, en augmentant son voltage.

La figure 259 représente schématiquement l'ensemble et certains détails

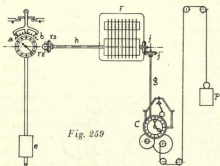


Fig. 259

essentiels de l'horloge-mère à déclenchement mécanique de Hipp. Celle-ci se décompose en trois parties principales, qui sont :

1^o Le régulateur proprement dit qui consiste en un pendule *e* (fig. 259) battant la seconde et en un mécanisme d'échappement à ancre *b* du type Graham, à leviers en pierre fine.

2^o Un fort mouvement d'horlogerie *C* sur lequel réagit le lourd poids-moteur *P* et qui est réglé par un volant à ailettes, ou par un pendule conique à force centrifuge.

3^o Un appareil à contacts *F* portant les interrupteurs de groupes et le renverseur de courant.

Ces trois mécanismes sont partiellement solidaires et partiellement indépendants les uns des autres. Voici, d'une manière générale, quel est le jeu de leur ensemble :

Lorsque la roue d'échappement *a* du régulateur proprement

dit a fait une révolution complète, elle déclanche, par l'intermédiaire de leviers de détente convenablement disposés, le grand mouvement d'horlogerie *C*. Celui-ci, sous l'action du poids *P*, entre en marche et fait faire un demi-tour à l'axe vertical *g* et à l'axe horizontal *h*. Sur ce dernier est calé le cylindre à cames faisant fonctionner le renverseur de courant et fermant successivement les interrupteurs de groupes. L'axe horizontal *h*, prolongé du côté de l'échappement Graham, remonte en même temps une roue satellite dentée dont la chute lente entretient, pendant une minute, la marche saccadée de la roue d'échappement et les oscillations du pendule à secondes. Avant la fin de la demi-révolution de l'axe *h*, les divers leviers et tiges de détente sont, au moyen de deux excentriques, remis en place de manière à être prêts à subir le prochain déclanchement. Enfin des disques à entailles, calés sur deux des mobiles du mouvement d'horlogerie *C*, produisent automatiquement l'arrêt de son rouage et de son volant régulateur.

On voit, d'après ce qui précède, que le train d'horlogerie *C* et

les axes qu'il commande, sont animés de mouvements intermittents dont la durée est inférieure à une minute. Par contre, la roue d'échappement et le pendule du régulateur proprement dit, fonctionnent d'une manière continue sous l'influence du poids de la roue satellite qui est remonté à chaque minute. Nous allons entrer dans le détail de ces divers mécanismes.

La figure 260 montre tout d'abord la disposition de la roue d'échappement et de son moteur à force constante. Cette roue se voit en *a* ; elle a trente dents sur lesquelles

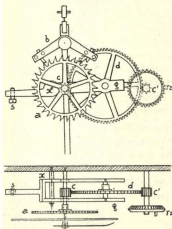


Fig. 260

réagissent à tour de rôle et de la manière connue, les becs de l'ancre *b*. Son axe porte un pignon *c* dans les ailes duquel engrènent les dents de la roue satellite *d*. L'axe de celle-ci est porté par les deux branches parallèles d'une pièce *g* en forme de fourchette, pouvant

tourner autour d'un axe x placé de l'autre côté du pignon c . Le poids de la pièce g , augmenté de celui de la roue d , tend ainsi à faire tourner le pignon c et la roue d'échappement a dans le sens de l'aiguille d'une montre.

Lorsque la fourchette g et la roue satellite sont arrivées au bas de leur course, c'est-à-dire lorsque la roue d'échappement a a fait

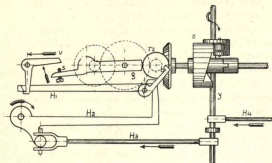


Fig. 261.

un tour complet, la vis s , adaptée à l'extrémité de g de l'autre côté de son axe x , atteint sa position la plus élevée et opère alors instantanément le déclenchement du premier et ensuite de tous les autres leviers de détente qui mettent en liberté le volant du mouvement d'horlogerie C . Celui-ci, et avec lui l'axe horizontal h de l'appareil à contacts, entre en marche. Une roue conique r_2 (fig. 260) engrenant avec une autre roue conique r_3 de diamètre double calée sur cet axe horizontal (fig. 259), fait alors un tour complet et remonte ainsi, par l'intermédiaire d'un second pignon c' , la roue satellite d et son support g (fig. 260). La roue d'échappement a est ainsi toujours sollicitée à tourner, même pendant la durée de son remontage. Sur son axe est fixée une aiguille à secondes parcourant les divisions d'un cadran spécial.

Dans les figures 261, 262 et 263 sont représentés les divers leviers et tiges opérant le déclenchement du mouvement d'horlogerie C . On voit en s la vis qui est adaptée à l'extrémité gauche de la fourchette g de la figure 260. Cette vis, arrivée à sa plus haute position, fait légèrement tourner autour de son axe le levier en équerre v dont la branche inférieure laisse échapper les leviers H_1 et H_2 (fig. 261) ; ce dernier, en tombant, déplace vers la gauche la tige hori-

zontale H_3 qui fait alors tourner d'une certaine quantité l'axe vertical y et tire à son tour, également vers la gauche, la tige H_4 . L'extrémité droite de H_4 est attachée au bout de la branche inférieure du levier en forme d'équerre H_5 qui est mobile autour de l'axe horizontal m (vu debout sur la fig. 262) et dont l'autre branche porte à son extrémité droite la tige verticale t . Le déclenchement des leviers et tiges précédents, déplace de haut en bas et d'une certaine quantité cette tige t . On voit sur la figure 262 l'axe horizontal h portant le cylindre à cames n_1, n_2, n_3 , etc., de l'appareil à contacts.

La figure 263 donne la disposition des leviers de déclenchement et d'arrêtage automatique du grand mouvement d'horlogerie C : t est l'extrémité inférieure de la tige verticale dont nous venons de parler ; elle est attachée à un levier H_6 dont la chute provoque, par l'intermédiaire de la goupille i , le déplacement angulaire autour de son axe, du levier à quatre branches Q et par suite la mise en liberté du dernier mobile NW , sur lequel est calé le volant à deux ailes O du grand mouvement d'horlogerie C .

Le recrochement de tout le système de déclenchement est produit par l'excentrique o (fig. 261) calé sur l'axe du cylindre à cames et par une goupille fixée sur la face antérieure de la roue conique r_2 (voir aussi fig. 260) remontant l'échappement à force constante.

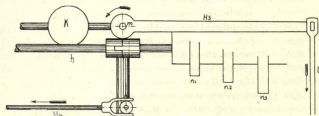


Fig. 262

Le contrepoids K réglable (fig. 262) sert à équilibrer en partie le poids de la tige t .

Avant la fin du mouvement, et sous l'effet de l'excentrique o , la tige t a relevé le levier H_6 (fig. 263), en sorte que rien n'empêche plus les extrémités repliées des deux branches inférieures du levier multiple Q de tomber dans les entailles des disques d'arrêtage automatique R et S et d'arrêter ainsi, par l'intermédiaire du bras D de Q , le doigt N du volant O .

Il nous reste maintenant à décrire l'appareil à contacts *F* de la figure 259 et à donner la disposition des interrupteurs de groupes et du renverseur de courant, telle qu'elle a été définitivement adoptée par les successeurs de Hipp, à la suite de nombreuses et décisives expériences continuées après la mort de ce constructeur.

Ainsi que cela arrive quelquefois aux inventeurs à imagination féconde, Hipp, après avoir amené à un très haut degré de per-

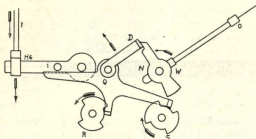
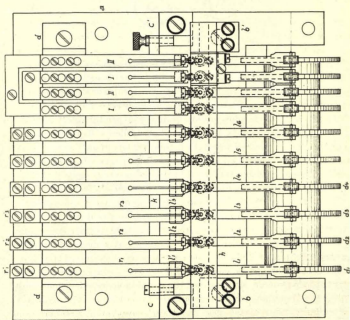
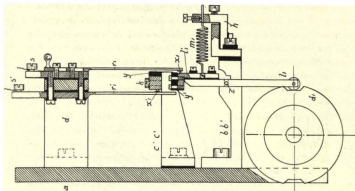


Fig. 263

fection l'horloge-mère mécanique que nous décrivons ici, en modifia tout à coup l'appareil à contacts pour le faire bénéficier des avantages très réels qu'il avait obtenus de son interrupteur à triple lamelle, tel que nous l'avons décrit à page 284 et tel qu'il l'avait appliqué auparavant, avec le plus grand succès, à sa pendule électrique de haute précision. Mais la triple lamelle, excellente dans ce dernier cas, ne donna que des résultats médiocres lorsqu'on l'adapta à la distribution de l'heure civile. On trouve aux pages 107 et suivantes de la deuxième édition française du présent ouvrage (celle de 1892), la description et les figures relatives à cet essai d'adaptation. Nous nous abstenons de les reproduire ici, d'abord parce que, précisément, la disposition qu'elles représentent n'a pas donné les résultats favorables que son auteur en attendait, et ensuite parce que l'intérêt historique qu'elles peuvent avoir est suffisamment sauvegardé du fait de l'existence de cette deuxième édition. On se bornera ici à indiquer la cause de l'insuccès constaté. Elle découle très simplement de la remarque, déjà faite ailleurs, sur la nécessité qu'il y a à munir une horloge-mère à grande capacité travaillant à voltage relativement peu élevé, de contacts à *forte pression* capables de livrer un passage sûr à des émissions de courant relati-



vement intenses. Or, cette condition est imparfaitement remplie avec la triple lamelle, puisque c'est le seul poids (et encore partiel) des trois lamelles juxtaposées, qui détermine la valeur maximum de la pression au contact correspondant. Pour des raisons d'ordre cinématique, qu'il serait inutile d'exposer longuement ici, le poids des lamelles ne peut être augmenté beaucoup. En outre, le fait qu'elles sont simplement *posées* sur la pièce platinée qui leur sert à la fois de support et d'axe et qui fait partie du circuit à parcourir par les émissions du courant, leur communique une instabilité mécanique peu propre à assurer, là aussi, un contact suffisant, lorsque la paroi contre laquelle est fixée l'horloge-mère, est elle-même dépourvue d'un minimum de stabilité. L'expérience a démontré que le voisinage immédiat de rues ou de lignes de chemin de fer à lourd trafic, avait pour effet de faire « danser » les lamelles sur leurs supports et de les rendre impropres à leur fonction d'interrupteurs.

Les figures 264 et 265 donnent, l'une la vue de devant, l'autre la coupe verticale, vue de côté, de l'appareil à contacts *F* (fig. 259), tel que le construit actuellement la maison Favarger & C^{ie}, à Neuchâtel.

Sur la plaque de base *a* de cet appareil (plaque qui est elle-même fixée, au moyen de quatre piliers, sur un fort support en fonte de fer auquel est également adapté le mécanisme de l'échappement du régulateur proprement dit et des leviers déclancheurs voisins), se trouvent solidement vissés divers ponts robustes *b* et *b'*, *c* et *c'* et enfin *d*. Deux ponts non dessinés sur les fig. 264 et 265, mais qu'on voit sur la planche I, servent de supports (coussinets) aux deux pivots de l'axe horizontal du cylindre à cames (*h* de la fig. 259) ; en outre l'un d'eux, celui de droite, est muni d'un prolongement servant de coussinet au pivot supérieur de l'axe vertical *g* de la fig. 259 lequel, au moyen des deux roues coniques de même diamètre *f* et *f'*, transmet à ce cylindre, ou, mieux dit, à son axe *h*, le mouvement rotatif du train d'horlogerie *C* (fig. 259 et pl. I), quand ce dernier est actif. On voit en *d*₁, *d*₂, *d*₃, etc., des figures 264 et 265 les disques à cames dont les saillies lèvent et abaissent alternativement les extrémités inférieures des leviers à roulettes *l*₁, *l*₂, *l*₃, etc. Ce sont les extrémités supérieures *l*₁', *l*₂', *l*₃', etc., de ces mêmes leviers qui, isolées et garnies de platine, constituent avec les doubles ressorts platinés *r*₁, *r*₂, *r*₃, etc., *r*₁', *r*₂', *r*₃', etc., les interrupteurs de groupes des horloges secondaires. Chacun de ces leviers est monté indépendamment des autres sur un axe commun qui, sous

la forme d'une longue tige horizontale z (fig. 265), est porté par les deux ponts b et b' en regard de la longue traverse isolée k qui relie ces ponts entre eux.

Les doubles ressorts r_1, r_2, r_3 , etc., respectivement r'_1, r'_2, r'_3 , etc., sont vissés *isolément*, les premiers sur la face antérieure, les seconds sur la face postérieure du pont d . La coupe verticale de la figure 265 montre comment chaque paire des ressorts-interrupteurs est disposée par rapport au levier l' correspondant et à une longue traverse k portée par les ponts isolés c et c' .

Les extrémités supérieures de chaque paire de ressorts-interrupteurs r et r' sont reliées aux deux fils principaux du groupe correspondant d'horloges secondaires, au moyen de deux fortes vis de serre-fils s et s' .

Pour un disque à cames donné, d_1 par exemple, le contact de groupe correspondant x_1 est fermé et une émission de courant circule dans ce groupe, lorsque la roulette de son levier l_1 est *tombée*, sous l'influence du ressort antagoniste m_1 , dans l'un des deux vides du disque d_1 ; en effet, dans cette position, qui est ainsi celle de *travail*, le contact platiné du levier l'_1 touche l'extrémité inférieure platinée du ressort antérieur r_1 , et, en outre, le contact platiné x'_1 du ressort postérieur correspondant r'_1 touche une goutte de platine qui lui fait vis-à-vis sur la longue traverse k . Celle-ci, qui passe entre toutes les paires des ressorts r et r' sert de chemin de retour commun à tous les groupes. On constate ainsi que l'interrupteur de chaque groupe d'horloges secondaires est *bipolaire*.

Lorsqu'au contraire la roulette du levier de groupe l_1 est *relevée* par l'une des deux longues saillies du disque d_1 , les contacts x_1 et x'_1 sont tous deux interrompus; c'est la position de *repos* du groupe, celle où aucune émission de courant ne le parcourt et alors l'isolation parfaite des deux ressorts (et par conséquent du groupe d'horloges secondaires lui-même) est assurée, pour l'antérieur par le long bloc en ébonite y fixé sur la face antérieure de la traverse k et, pour le postérieur, par le petit bloc y' également en ébonite du levier l'_1 .

Ce qui précède ne s'applique qu'aux ressorts de contacts r et r' qui, numérotés 1, 2, 3, etc., et placés à la *gauche* de l'appareil, sont reliés directement par paires aux deux fils principaux de chaque groupe. Les quatre ressorts analogues, numérotés I, II, I, II, qui sont placés à la *droite* de l'appareil à contacts et seulement antérieurement (c'est-à-dire dans le même plan vertical que les res-

sorts antérieurs r_1, r_2, r_3 , etc.), et qui, reliés deux à deux comme l'indique la figure 264, reçoivent en outre, à leurs extrémités supérieures conjuguées, les deux fils de la source de courant de la cen-

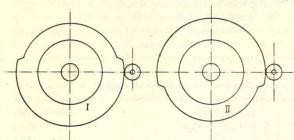


Fig. 266

trale horaire, constituent, avec les quatre disques du cylindre à cames qui leur font vis-à-vis, le *renverseur de courant* commun à tous les interrupteurs de groupes.

Ces quatre disques ont chacun deux longues saillies et deux vides ou creux plus courts (fig. 266). Ici encore un creux correspond à la position de travail (contact fermé) du ressort simple correspondant et la saillie à la position de repos (contact interrompu) de ce ressort. On voit d'autre part sur la fig. 267 que les creux des disques d_1, d_2, d_3 , etc., correspondant aux interrupteurs de groupes, apparaissent comme *décalés* d'un certain angle les uns par rapport aux autres, quand on place son œil sur le prolongement de l'axe du cylindre à cames. La grandeur de cet angle de décalage dépend du nombre de groupes que l'appareil à contacts doit actionner. Dans l'appareil que nous décrivons ici, ce nombre est 6, mais il peut être inférieur ou supérieur à ce chiffre. Comme le cylindre à cames et le mouvement d'horlogerie C qui le commande sont disposés de manière à effectuer un

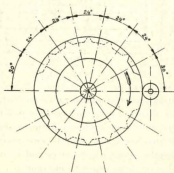


Fig. 267

demi-tour par minute ou, mieux dit, par déclanchement ayant lieu à chaque minute, il en résulte que si, lors de la première demi-révolution de ce cylindre, les émissions de courant envoyées successivement dans tous les groupes d'horloges secondaires sont positives, elles seront négatives lors de la seconde demi-révolution. Pour qu'il en soit ainsi, il faut que les creux des quatre disques I, II, I, II, du renverseur de courant, laissent *fermés*, deux à deux, les ressorts-interrupteurs correspondants pendant tout le temps que se ferment eux-mêmes successivement tous les ressorts-interrupteurs de groupes, et alors les 4 disques I, II, I, II, doivent nécessairement avoir la forme indiquée sur la fig. 266, les deux

disques I étant décalés de 180 degrés d'arc par rapport aux deux disques II.

Le schéma de la figure 268 fait voir quelle est la marche des émissions de courant alternativement renversées à chaque minute. *P* est la source de courant, *R* le renverseur de courant avec ses 4 ressorts plats

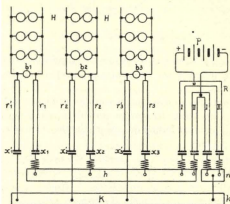


Fig. 268

I, II, I, II conjugués deux à deux. $r_1, r_2, r_3 \dots$ et $r'_1, r'_2, r'_3 \dots$ sont les diverses paires de ressorts des interrupteurs de groupes reliées chacune à un groupe d'horloges secondaires *H*. x_1, x_2, x_3 , etc., sont les contacts des ressorts antérieurs communiquant, lorsqu'ils sont fermés, avec les équerres isolées des leviers l_1, l_2, l_3 , etc., et par elles et leurs ressorts antagonistes avec une pièce métallique isolée *h* (voir aussi fig. 264 et 265) dont l'extrémité droite se termine sur la ligne verticale qui divise, en deux parties égales et symétriques, le renverseur *R*. x'_1, x'_2, x'_3 , etc., sont les contacts des ressorts postérieurs r'_1, r'_2, r'_3 , etc.; ils relient lorsqu'ils sont fermés, ces mêmes ressorts avec la traverse métallique *k* déjà mentionnée tout à l'heure, laquelle est en outre en communication avec une lame

courte isolée n qui fait face aux deux ressorts de droite I et II du renverseur R .

Supposons que tôt après l'un des déclenchements que subit, à la fin de chaque minute, le grand mouvement d'horlogerie C de la figure 259, ce sont les deux ressorts II de R qui sont en contact (par l'intermédiaire des deux ressorts antagonistes de leurs leviers à roulettes), l'un avec la traverse h , l'autre avec la lame n , le trajet de l'émission de courant correspondante sera le suivant :

P^+ — ressort II de droite — lame n — traverse h — contact x'_1 du 1^{er} groupe d'horloges H (ressort r'_1 postérieur) — électro-aimants en dérivation de toutes les horloges réceptrices de ce groupe (l'émission positive entre en eux par la gauche et en sort par la droite) — contact x_1 du 1^{er} groupe (ressort r_1 antérieur) — pièce métallique h — ressort II de gauche de R — P^- .

Le circuit est complet et le premier groupe des horloges secondaires H a reçu une émission positive qui a fait avancer brusquement d'une division toutes leurs aiguilles à minutes. Le second groupe (commandé par les deux contacts x_2 et x'_2) reçoit, grâce au décalage des creux du disque à cames d_2 par rapport aux creux du disque d_1 , une seconde environ après le premier, son émission positive et avancée à son tour d'une minute. Une seconde plus tard, c'est le troisième groupe qui saute à son tour. Et ainsi de suite pour les groupes suivants.

Lorsque tous les groupes d'horloges secondaires ont ainsi fonctionné chacun à son tour, l'arrêtage automatique du grand mouvement d'horlogerie C se produit, et le cylindre à cames ayant accompli sa demi-révolution, entre lui-même en repos.

Au commencement de la minute suivante, un nouveau déclenchement a lieu qui remet en marche le mouvement C et le cylindre à cames ; mais cette fois-ci, ce sont les disques et ressorts I du renverseur de courant R qui entrent en action et alors le trajet de l'émission correspondante est le suivant :

P^+ — ressort I de gauche du renverseur R — traverse h — contact x_1 du premier groupe H (ressort antérieur) — électro-aimants des horloges secondaires de ce groupe (cette fois l'émission venue du pôle positif de P entre par la droite dans ces électro-aimants et en sort par la gauche) — contact x'_1 du premier groupe (ressort postérieur) — traverse h — lame n — ressort I de droite — P^- .

Les deux émissions successives dont nous venons de donner les trajets, sont ainsi inverses l'une de l'autre dans les électro-aimants des horloges H . Si donc la première demi-révolution du cylindre à

comes a pour effet de faire sauter toutes les aiguilles de minutes des horloges secondaires sur les divisions *paires* de leurs cadrans, sa seconde demi-révolution les fait toutes sauter sur les divisions *impaires*.

Chaque interrupteur de groupe de l'appareil à contacts que nous venons de décrire peut, sans danger, livrer passage à un courant de 1,25 ampère et être chargé ainsi, à raison de 50, 125, 250 cadrans secondaires (p. 350 et suivantes) selon le voltage et le nombre d'ampères-tours adopté pour chacun de ces derniers. Un appareil à contacts ayant un clavier de 10 interrupteurs de groupes pourrait donc actionner respectivement 500, 1250, 2500 cadrans. D'autre part, rien ne s'oppose à ce que l'on juxtapose plusieurs appareils à contacts complets, les axes de leurs cylindres à comes étant placés dans le prolongement les uns des autres et tous commandés au moyen d'une seule et même paire de roues coniques par un seul et même mouvement d'horlogerie *C* ; les dimensions et le poids moteur *P* de ce dernier doivent, cela va de soi, être renforcés de manière à faire face à l'augmentation des résistances mécaniques provenant de plusieurs appareils à contacts ainsi juxtaposés. Chacun de ceux-ci a son renverseur *R* spécial et aussi par conséquent sa prise distincte sur la source de courant.

La planche *I* empruntée à l'ouvrage du Dr H. Schneebeli, qui a été publié en 1878, donne une vue générale du mécanisme de l'horlogemère à déclenchement de Hipp, telle que celle-ci a été installée par l'auteur de ces lignes, en 1876, dans l'une des salles de l'Hôtel de ville de Neuchâtel, et qui dès lors n'a pas cessé d'actionner le réseau des horloges électriques publiques et privées de cette ville. On retrouve sur cette planche le détail exact de la plupart des organes dessinés plus ou moins schématiquement dans les figures 259 et suivantes. On constate en outre que le régulateur du grand mouvement d'horlogerie *C* est ici non pas un volant ordinaire à ailettes réglables, mais bien un pendule conique à force centrifuge ; que l'appareil à contacts diffère sur certains points de celui que représentent les figures 264 et 265, parce que le premier, au lieu d'être prévu pour double fil (lacet), n'est applicable qu'à des réseaux à simple fil, avec retour du courant par la terre ; parce qu'en outre la disposition de ses ressorts d'interrupteurs de groupes, de ses leviers à roulettes et des disques du cylindre à comes correspondant, est celle que Hipp avait primitivement adoptée, et qui a été, après sa mort, modifiée par ses successeurs en tenant compte des nombreuses et longues

expériences faites depuis par ceux-ci. On constate enfin que dans l'appareil primitif de Hipp décrit par Schneebeli, le dispositif évitant les inconvénients des extra-courants de fermeture et d'ouverture des circuits de groupes, repose sur le principe qu'illustre la figure 189 de la page 283 et d'après lequel on offre à ces extra-courants un circuit dérivé où ils circulent, pendant un court instant, avant et après que se ferme lui-même le circuit principal commandé par l'inter-rup-teur de groupe proprement dit.

Dans l'appareil à contacts pour double fil, actuellement adopté par la maison Favarger et C^{ie} et représenté schématiquement sur la figure 268, le dispositif adopté pour annuler les effets des extra-courants est basé sur l'emploi de résistances bifilaires (p. 285) intercalées en dérivation avec les électro-aimants des horloges secondaires, à l'origine des fils principaux de groupe. Sur le schéma de la fig. 268, ces résistances se voient en b_1 , b_2 , b_3 , etc.

Afin d'éviter d'avoir à remonter à la main, à intervalles de temps plus ou moins rapprochés, le lourd poids moteur du mouvement d'horlogerie *C*, la maison Favarger et C^{ie} munit ce dernier, sur demande, d'un dispositif de remontage automatique analogue à celui que nous avons décrit à page 208. L'aspect extérieur d'un tel mouvement devient alors celui qui est représenté en vue de face et de côté sur la figure 269. Celle-ci se comprend sans longues explications. Insistons cependant sur les points suivants, qui ont leur intérêt : le poids mouflé *P* se remontant automatiquement toutes les 6 heures, sa course totale, entre deux remontages successifs, a pu être réduite à 60 centimètres environ, ce qui permet de le suspendre directement au-dessous du mouvement *C*, entre le support en fonte de fer de ce dernier et le plancher. Cette disposition a, il est vrai, pour effet de supprimer la réserve de chute qu'il est désirable d'avoir en cas de « ratés » (p. 207) ; mais l'expérience a démontré que ces ratés sont extrêmement rares, grâce aux progrès accomplis pendant ces dernières années dans le domaine de l'électromécanique horlogère, et qu'il y a, par suite, avantage à substituer au remontage automatique qui a manqué, un simple remontage à la main (on voit sur la fig. 269, dessinée en pointillé, la manivelle destinée à cet usage).

Pour éviter que ce remontage manuel n'ait lieu tardivement, c'est-à-dire après l'arrivée du poids sur le plancher et l'arrêt de l'horlogemère faute de force motrice, il suffit de placer, entre ce plancher et un ni-

veau légèrement supérieur correspondant à celui que le poids atteint au moment où le contact principal qui a raté aurait dû se produire, un, ou même, pour plus de sûreté, plusieurs petits contacts auxiliaires que le poids moteur ferme en passant et qui mettent en action dans la chambre du surveillant que cela concerne, une sonnette

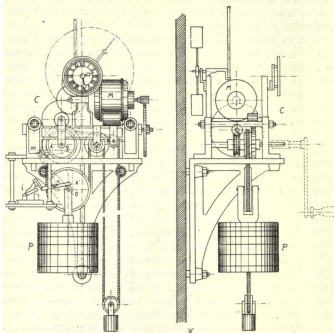


Fig. 269

électrique trembleuse. A l'ouïe de celle-ci, ce surveillant sait de quoi il s'agit et s'empresse, toute autre occupation cessant, d'aller opérer le remontage manuel de l'horloge-mère et ensuite de remédier au défaut qui a produit le raté. Un petit moteur électrique de 0,1 à 0,2 cheval (selon l'importance du poids), suffit à assurer le remontage automatique, dont la durée n'est que d'une fraction de minute. On voit en *g* la goupille qui, fixée sur l'un des mobiles de *C* faisant un tour en 6 heures, réagit sur le levier de déclenchement à 2 bran-

ches k (pivoté en m), et, en i , l'interrupteur à action brusque qui commande le moteur électrique remonteur M ; enfin k' est le levier de cet interrupteur qui fait tomber celui-ci en position fermée, lorsque l'échappement à deux crans n le lâche. A la fin du remontage, le poids P arrivé dans sa position la plus élevée, relève par l'intermédiaire de son support o le levier k' qui remet, brusquement aussi, l'interrupteur en position ouverte et arrête ainsi le moteur électrique.

Qu'il nous soit permis d'insister ici sur le fonctionnement parfait qui est la caractéristique de l'horloge-mère à déclenchement de Hipp, telle qu'elle a été réalisée par ce génial inventeur, dès 1874, en ses parties essentielles. Les exemplaires de ce type livrés depuis cette époque, soit par Hipp lui-même, soit par ses successeurs, dans diverses villes de la Suisse et de l'étranger, ont donné partout pleine satisfaction et l'on peut dire que c'est à ce parfait fonctionnement et à celui, non moins essentiel, des compteurs électrochronométriques à armatures polarisées, qu'est dû le fait suivant : les nombreuses distributions d'heure avec horloges publiques qui ont été installées selon le système de la maison de Neuchâtel et auxquelles leurs propriétaires (administrations municipales et autres) ont su consacrer un minimum de surveillance et d'entretien (minimum qui a généralement pu être obtenu à deux ou trois exceptions près), toutes ces distributions d'heure, disons-nous, même celles remontant à 45 ans en arrière, sont, encore aujourd'hui, non seulement en pleine activité, mais même en plein développement, si bien que des réseaux qui, au début, ne comprenaient qu'une vingtaine ou tout au plus une cinquantaine de cadrans unifiés, en comptent aujourd'hui 200, 300, 500, 800 et plus, selon l'importance et la puissance d'extension ou d'achat des villes dans lesquelles les centres horaires primitifs ont été mis en fonction.

Si ce fait, à notre humble avis décisif, et que d'ailleurs la maison suisse n'est pas seule à pouvoir appeler en témoignage, était de nature à engager le professeur Bouasse, de Toulouse, à modifier quelque peu la sentence sévère qu'il a émise récemment (sentence dont nous avons reproduit le texte exact à la page 271 et à laquelle il regrettera certainement, plus tard, d'avoir donné l'essor), — nous ne regretterions pas le temps consacré à faire la démonstration du succès, aujourd'hui incontestable, auquel ont abouti les longs et patients efforts d'inventeurs et de praticiens dont seule l'ingénio-

sité a, jusqu'ici, arrêté l'attention, un peu trop dédaigneuse, de l'éminent professeur !

Autres types d'horloges-mères à déclenchement mécanique.

— Certains constructeurs attachent beaucoup d'importance au principe des *contacts frottants*, qui ont, disent-ils, l'avantage d'éloigner automatiquement les matières étrangères plus ou moins isolantes

(oxydes métalliques, grains de poussière, etc.) qui pourraient s'intercaler entre les surfaces des interrupteurs et empêcher le libre passage, en cet endroit, des émissions du courant.

La figure 270 représente une disposition des contacts de groupes que Hipp a appliquée avec succès à un type

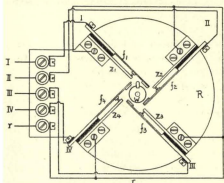


Fig. 270

d'horloge-mère à déclenchement plus ancien que celui que nous venons de décrire. Les ressorts plats isolés f_1, f_2, f_3, f_4 , auxquels viennent s'attacher les fils principaux de groupes I, II, III, IV, sont disposés en cercle autour de l'axe du mobile de l'appareil à contacts, qui fait, en quelques secondes, un tour à chaque minute ou plutôt à chaque déclenchement. L'extrémité prolongée de cet axe porte, en avant de la platine antérieure de cet appareil, un petit manchon ω sur la périphérie duquel un doigt en platine fait saillie. C'est ce doigt qui, à mesure que ω tourne, vient successivement toucher, en les frottant, les extrémités platinées des ressorts fixes f_1, f_2, f_3, f_4 et qui constitue ainsi, avec ceux-ci, les interrupteurs de groupes produisant le saut des aiguilles des compteurs électrochronométriques correspondants ; r est le fil de retour commun des groupes. Les ressorts plats z_1, z_2, z_3, z_4 , non isolés de la masse, sont en contact, avant et après les émissions principales passant par $\omega f_1, \omega f_2, \omega f_3, \omega f_4$, avec les seconds points platinés que les ressorts f_1, f_2, f_3, f_4 ont en arrière de ceux que frotte le doigt ω ; celui-ci lorsqu'il touche f_1 , par exemple, l'éloigne de z_1 , et rompt ainsi, pendant la durée du contact principal ωf_1 , le contact auxi-

liaire $f_1 z_1$. On reconnaît dans ce dernier le dispositif de Hipp destiné à éviter les effets des extra-courants. Le renverseur de courant, non-représenté sur la figure 270, se trouve derrière la platine R ; il est, en principe, semblable à ceux déjà décrits ailleurs.

La figure 271 donne la disposition adoptée par *Grau* dans ses horloges-mères à 5 groupes. Ici, l'axe central tournant fait une révolution en deux minutes et porte deux ressorts frottants isolés s et s_1 , que les deux ressorts fixes c et c_1 et les deux bagues isolées a et a_1 relient avec les pôles de la source de courant. A chaque demi-révolution de l'axe central, s (respectivement s_1) touche successivement les plots fixes f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 , pendant que s_1 (respectivement s) touche l'arc platiné f_c relié par I_c avec le retour commun des cinq groupes d'horloges secondaires. On retrouve ici, pour obtenir le renversement des émissions de courant, la disposition de principe déjà décrite et représentée schématiquement à page 359.

Une disposition analogue a été employée par la maison *Siemens et Halske* dans ses horloges-mères électriques avec palette et contre-palette de Hipp.

Divers constructeurs, tel entre autres *Karl Marx*, à Hambourg,

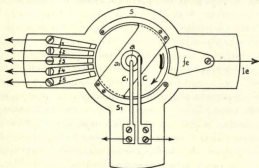


Fig. 271

ont fait usage, dans leurs appareils à contacts, d'interrupteurs-inverseurs à *mercure* actionnant un certain nombre de compteurs électrochronométriques intercalés en série. Ici les émissions de courant étaient prises sur le réseau urbain des fils de lumière, dont le voltage était amené au taux voulu par des lampes à incandescence formant résistance ohmique.

Les horloges de clochers employées comme horloges-mères.

— Nous avons vu à page 334 que de robustes mouvements d'horloges de clochers pouvaient être employés avec succès comme horloges-mères. La quantité de force emmagasinée dans le poids-moteur d'un pareil mécanisme est telle, en effet, qu'il est possible d'en dériver la portion relativement minime qui est nécessaire pour assurer le jeu correct d'un ou même de plusieurs interrupteurs de groupes pas trop chargés, et cela sans compromettre le bon fonctionnement de l'horloge elle-même. La roue d'échappement qui, dans la plupart des cas, fait un tour par minute, peut être directement munie du ressort de contact venant successivement toucher les plots fixes des interrupteurs de groupes. Le nombre de ceux-ci ne devra cependant pas dépasser la limite au delà de laquelle les frottements mécaniques qui résultent de leur fonctionnement, risqueraient soit d'arrêter la roue, soit de perturber sa marche. Lorsque ce nombre dépasse deux ou trois, il est préférable d'installer un appareil à contact spécial déclenché périodiquement par un mobile approprié de l'horloge de clocher, et l'on retombe alors dans le cas déjà traité précédemment (p. 360).

Horloges-mères pour compteurs à armatures non-polarisées.

— Ici, le renverseur de courant est supprimé et le rôle de l'horloge-mère se borne à fermer, à intervalles réguliers, un interrupteur; ce dernier, sous sa forme la plus simple, consiste en un ressort fixe que viennent toucher, à chaque tour ou fraction de tour, une ou plusieurs goupilles placées sur la roue d'échappement. Nous avons déjà fait ressortir les inconvénients de cette disposition, lorsqu'elle est appliquée à de simples pendules mécaniques à poids ou à ressort.

Relevons encore l'impossibilité où l'on se trouve, en employant de tels contacts, d'augmenter dans une proportion notable le nombre des compteurs ainsi actionnés par la même horloge-mère. Il n'est plus admissible en effet de répartir les compteurs en de nombreux groupes, car la roue d'échappement ne pourrait vaincre les frottements produits par 2, 3, 4, etc., interrupteurs de groupes placés les uns à la suite des autres.

Les reproches ci-dessus s'adressent également à toutes les horloges-mères à remontoir électrique non pourvues d'un appareil à contacts à déclenchement et dans lesquelles c'est le mouvement d'horlogerie, remonté à intervalles plus ou moins courts ou plus ou moins réguliers, qui opère lui-même directement les contacts. Comme, dans la plupart des cas, ce mouvement est réglé par un échappement mécanique à

ancre ou à cylindre, on n'a pas à disposition une réserve de force motrice suffisante pour assurer, sans perturbation de la marche de l'horloge-mère, des pressions de contacts convenables. Il est bon cependant de remarquer ici que lorsque l'interrupteur à minute (ou autre fraction de temps), fermé, soit par la roue d'échappement elle-même, soit par tout autre mobile plus ou moins rapide du mouvement d'horlogerie, a pour seul but d'entretenir la marche de ce dernier, l'intensité des émissions de courant peut toujours être choisie assez faible pour que l'on puisse réduire à un minimum très acceptable la pression au contact et la résistance mécanique correspondante, et alors on peut obtenir une marche excellente de l'horloge à remontoir.

Mais lorsque, pour faire de cette dernière une horloge-mère, on intercale parallèlement à l'électro-aimant remonteur ou en série avec lui, des compteurs électrochronométriques à émissions toujours de même sens, on augmente du même coup la force du courant passant par l'interrupteur ; on est obligé alors d'accroître la pression au contact, la résistance mécanique qui en est la conséquence et par suite, dans une progression rapidement croissante, les chances de très mauvaise marche ou même d'arrêt de l'horloge-mère et de tout le système des horloges secondaires qui en dépend.

Si nous insistons ici sur ce point spécial, c'est pour éviter, si possible, le renouvellement d'expériences fâcheuses qui ont été faites il y a quelques années et dont les conséquences regrettables sont, encore aujourd'hui, sensibles sous la forme d'un véritable *discrédit* jeté illégitimement sur toute l'horlogerie électrique.

Horloges-mères avec relais interposés entre elles et leurs horloges secondaires. — On a cherché à supprimer ou à atténuer les inconvénients que nous venons de signaler, en interposant entre l'interrupteur de l'horloge-mère et les compteurs qu'il commande, un *relais électrique*, autrement dit un appareil électromagnétique ayant pour but et pour effet de reporter sur un interrupteur robuste (à forte pression), la tâche que l'interrupteur proprement dit, trop délicat (à faible pression), ne pourrait à lui seul accomplir avec sûreté.

La figure 272 représente, sous sa forme la plus simple, un tel relais. *a* est un électro-aimant en fer à cheval dont la seconde bobine est, sur notre croquis, cachée derrière la première *b*. Le levier *c*, dont l'axe oscillant est en *d* et le ressort antagoniste en *e*, porte en *f* une armature plate en fer doux qui est brusquement attirée par les deux pôles de

a dès que les deux bobines *b* intercalées en série ou en parallèle et dont on voit en *g* et *g'* les fils d'entrée et de sortie, sont parcourues par le courant d'une source d'électricité relativement faible *p* mise en action par l'interrupteur proprement dit *i*. L'attraction de *c* peut, malgré l'intensité relativement petite du courant fourni par *p* et la délicatesse du contact à faible pression *i*, être très énergique et fermer l'interrupteur *I* du circuit secondaire du relais ($P-E d c I P^+$) avec une

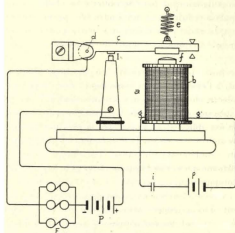


Fig. 272

pression considérablement plus grande que celle qui est possible ou admissible en *i*. On pourra donc donner à la source de courant *P*, que met en action *I*, et aux résistances d'enroulement des électro-aimants *E* intercalés en parallèle (ou en série) dans le circuit secondaire, des valeurs assurant absolument le bon fonc-

tionnement des appareils récepteurs auxquels appartiennent les électro-aimants *E*.

Dans la disposition de la figure 272, la *durée* du contact *I* est pratiquement égale à celle de *i*. Or, comme *i* est lui-même, dans la plupart des cas, très bref, la durée de *I* sera trop courte pour que soit assuré le bon fonctionnement des armatures plus ou moins lourdes ou lentes des horloges à grands diamètres qui pourraient se trouver parmi les compteurs *E* du circuit secondaire. De là la nécessité de donner au relais d'autres dispositions ayant pour effet, soit de retarder par rapport à *i* le moment de la fermeture de *I* (relais de groupes), soit de prolonger la durée de cette fermeture. Feu le colonel David Perret, inventeur de l'horloge à remontoir que nous avons décrite à pages 192 et suivantes et du compteur de la page 295, s'est beaucoup occupé de la construction de relais à contacts prolongés, retardés, mul-

tiples, etc., afin d'appliquer son remontoir à la conduite de cadrans secondaires de toutes grandeurs et d'en faire ainsi, malgré la brièveté et la délicatesse de son contact *i*, une horloge-mère à plus ou moins grande capacité. On trouvera la description de ces divers dispositifs dans les nombreux brevets que David Perret a pris en Suisse et à l'étranger et qui sont aujourd'hui dépourvus, à peu de chose près, de valeur pratique.

Lorsqu'en effet on réfléchit au rôle que joue le relais électrique en matière d'unification d'heure, on constate que cet appareil a pour unique but de permettre l'intercalation de nombreuses ou de très grandes horloges secondaires, sur un ou plusieurs interrupteurs de groupes robustes. Or, nous avons vu que ce but était très sûrement atteint au moyen d'appareils à contacts déclenchés *mécaniquement* par l'horloge-mère proprement dite, ou au moyen d'horloges-mères électriques à réactions directes du genre de celle à palette de Hipp. De longues et décisives expériences ont démontré que, toutes les fois que cela peut se faire, il faut préférer les déclenchements purement mécaniques aux déclenchements électromagnétiques, tout d'abord parce que la source de courant spéciale que nécessitent ces derniers dans leurs circuits secondaires n'existe pas avec les premiers, et ensuite parce qu'avec plusieurs contacts se commandant les uns les autres en cascades, les chances de « ratés » augmentent très rapidement.

Nous avons vu comment on pouvait porter à un chiffre relativement très élevé, le nombre des horloges secondaires de toutes grandeurs pouvant être commandées très sûrement par un seul et même interrupteur de groupe et comment on pouvait multiplier presque indéfiniment le nombre des interrupteurs eux-mêmes (p. 352 et suivantes). Nous jugeons en conséquence inutile de développer plus longuement la question des relais électriques ordinaires appliqués systématiquement aux réseaux d'unification électrique de l'heure.

On verra cependant au chapitre V que certaines formes de relais dites « pendulaires », dont le fonctionnement est très différent de celui des relais ordinaires du type de notre figure 272, jouent déjà actuellement et joueront encore dans l'avenir un rôle très important en électrochronométrie.

Remarquons ici, pour être complet, qu'un appareil à contacts tel que celui qui a été décrit dans les pages 366 et suivantes, pourrait fort bien être déclenché, non pas seulement mécaniquement au moyen des leviers employés par Hipp dans son horloge-mère à déclanchement, mais bien aussi *électromagnétiquement*, au moyen d'un simple

contact fermé une fois par minute par l'horloge-mère proprement dite et d'un électro-aimant libérant le volant du robuste mouvement d'horlogerie *C* représenté dans la figure 259 ; il suffirait pour cela d'adapter à la branche gauche du levier multiple *Q* de la figure 263 une armature plate en fer doux qu'attireraient les pôles de l'électro-aimant libérateur placé immédiatement au-dessous ; il vaudrait mieux encore employer ici un électro-aimant à armature polarisée, qui pourrait alors être commandé par les émissions alternées (à minute) d'une horloge-mère principale déjà pourvue de son appareil à contacts. Cette dernière disposition peut être employée avec succès, lorsque la situation géographique du centre horaire principal est trop défavorable (trop excentrique) pour permettre l'extension économique du réseau des fils principaux de groupes dans des quartiers très éloignés de l'horloge-mère proprement dite.

Horloge-mère de la Société « Magneta ». — Le système de distribution électrique de l'heure civile auquel la Société *Magneta* a attaché son nom, repose sur le principe de la production mécanique

des émissions de courant alternativement positives et négatives destinées à alimenter les horloges secondaires dont nous avons donné, à pages 313 et suivantes, la description. Ces émissions sont engendrées par l'horloge-mère elle-même, au moyen d'un petit appareil magnéto-électrique qu'un mécanisme approprié déclanche à chaque minute et que le poids moteur actionne plus ou moins directement, en faisant parcourir à l'inducteur mobile de ce générateur, des mouvements angulaires rapides de 35 à 45 degrés d'arc.

Les figures 273 et 274 donnent, la première en coupe verticale et horizontale, la seconde en perspective, la disposition de ce générateur qui a une certaine analogie avec celle des inducteurs d'appel des postes téléphoniques du type américain Bell. On voit en *E* la manivelle qui, fixée sur l'axe de l'inducteur et commandée par l'un des mobiles du mécanisme de l'horloge-mère faisant un demi-tour à chaque déclanchement, donne alternativement à cet inducteur les deux

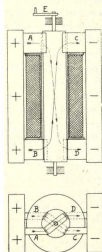


Fig. 273

positions *AD* et *BC* de la figure 273. Si l'une de ces positions (très brus-

quement prises, grâce à un système spécial de leviers, de bielles et de ressorts de détente et d'arrêtage dont la figure 275 donne une idée), provoque le lancement dans les horloges secondaires d'une émission positive, l'autre position leur enverra une émission négative. On voit en $+$ et $-$ (fig. 273) et en N (fig. 275), les pôles de l'aimant permanent fixe, dans le voisinage desquels s'opèrent les mouvements brusques de l'inducteur. Ces pôles sont en contact magnétique avec les deux plaques rectangulaires en fer doux qui portent le générateur et qui sont assemblées au moyen de 4 piliers cylindriques en laiton que l'on voit distinctement sur la figure 274. C'est sur ces plaques que sont fixés les quatre prolongements polaires AB , CD de la figure 273 (voir aussi fig. 274)

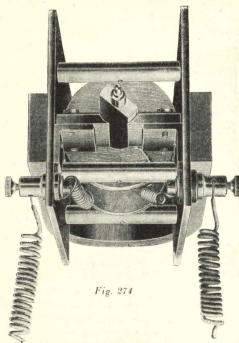


Fig. 274

entre lesquels se meut, sans les toucher, l'inducteur qui consiste lui-même en un noyau mobile de fer doux à faces latérales aplaties, qui est monté sur l'axe à manivelle E . Une bobine fixe, avec enroulement à fil isolé fin, enveloppe ce noyau et est ainsi parcourue, à chaque changement de position de ce dernier, par un bref courant induit que les fils de sortie en forme de boudins (fig. 274) permettent de lancer directement dans les électro-aimants des horloges secondaires. Ceux-ci étant intercalés en série sur un seul et même fil de groupe, comme le montre le schéma de la figure 276 ci-après, il en

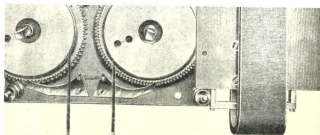


Fig. 275

alors il faut proportionner à la capacité choisie, le poids moteur et les dimensions des organes de l'horloge-mère. C'est ainsi que pour une petite installation de quelques cadrans, un poids de 25 kilogrammes remonté à la main une fois par vingt-quatre heures, suffit, tandis que pour actionner quelques centaines de cadrans, il faut recourir à des poids moteurs de plusieurs centaines de kilogrammes remontés automatiquement plusieurs fois par jour, au moyen d'un moteur électrique branché sur le réseau voisin des fils de lumière ou de force. Dans ces dernières horloges-mères, le nombre total des

compteurs à actionner est réparti en plusieurs groupes ou circuits ayant chacun son fil d'aller, son fil de retour (commun à tous les groupes) et sa bobine génératrice, et pouvant comprendre jusqu'à 100 unités secondaires (un cadran selon son diamètre équivaut à une ou à plusieurs unités, chaque unité correspondant à la quantité de courant qui est nécessaire pour actionner sûrement un seul cadran de 25 à 30 centimètres de diamètre ; un cadran de 40 cm. doit recevoir trois fois plus de courant qu'un cadran de 30 cm., un cadran de 60 cm. huit fois plus, etc.).

D'après ce qui précède, à 1, 2, 3, 4, 5, etc., bobines génératrices commandées à la fois par le mécanisme d'une seule et même horloge-mère *Magneta*, correspondront des capacités de respectivement 100, 200, 300, 400, 500, etc., unités secondaires.

La figure 277 donne la vue de devant d'une telle horloge-mère, dont la capacité totale est de 400 unités réparties sur quatre bobines généra-

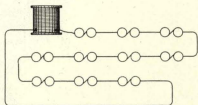


Fig. 276

trices. Son poids est remonté automatiquement par un moteur électrique d'une fraction de cheval.

Le système *Magneta*, dont le principe a été breveté en 1899 par M. Martin Fischer, de Zurich, avait été décrit, 8 ans auparavant, dans le numéro du 17 janvier 1891 du journal *La Lumière Électrique*, de Paris, où il était attribué à un inventeur russe. Recherches faites, il se trouve que l'idée de principe du système *Magneta* appartient à Prokhoroff et N. Fahlberg, de Kiew, qui l'ont fait breveter au Patent-Amt de Berlin sous le n° 56652, en 1890. Cette invention a, depuis, été perfectionnée dans quelques-uns de ses détails de construction et d'exécution.

Son principal avantage est de supprimer la pile et les interrupteurs. Mais, d'autre part, ce système présente de graves inconvénients résultant de la brièveté excessive des courants d'induction et de la nécessité où l'on se trouve de munir les mécanismes des horloges secondaires du ressort accumulateur dont il a déjà été parlé à page 314, et dont la présence constitue un obstacle presque absolu à l'appli-

cation d'un tel système à la commande de cadrans secondaires à grand diamètre, ou d'horloges de rue exposées aux intempéries de l'air extérieur.

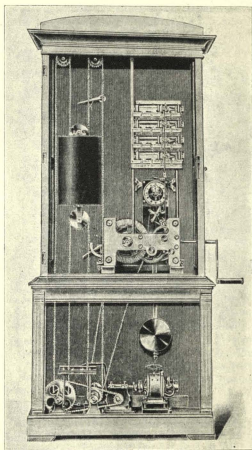


Fig. 277

Horloges-mères pour vaisseaux. — Par contre il a pu être appliqué avec succès là où le nombre des cadrans secondaires, tous in-

térieurs et à petits diamètres, ne dépasse pas une certaine limite. C'est le cas notamment lorsqu'il s'agit de distribuer l'heure civile unifiée dans les différents locaux d'un paquebot. Ici, l'horloge-mère ne peut plus être réglée par un pendule, dont les oscillations seraient continuellement perturbées par les mouvements du navire ; elle doit être munie d'un échappement de montre à spiral et à balancier circulaire. Pour corriger la marche des horloges et la mettre d'accord avec le temps du fuseau horaire que traverse le vaisseau, on arrête le système (horloge-mère et cadrans secondaires) en agissant sur un mouvement d'horlogerie auxiliaire dont on recule (avec la main) l'aiguille, du nombre de minutes voulu et qui remet ensuite le

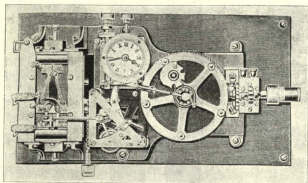


Fig. 278

tout automatiquement en marche à l'heure de ce fuseau. Si, au contraire, le système est en retard sur l'heure du fuseau traversé, on l'avance en actionnant rapidement à la main le petit générateur des courants d'induction. Ces manipulations, grâce à un ingénieux agencement des mécanismes, se font facilement et sans erreurs. La figure 278 donne une vue de devant de l'horloge-mère pour vaisseau, type Magneta, que nous venons de décrire rapidement.

La société *Normal-Zeit*, de Berlin, qui s'est également occupée du problème de l'unification de l'heure sur les vaisseaux, emploie, elle aussi, une horloge-mère réglée par un échappement de montre insensible aux mouvements de la mer ; mais ici, c'est une source de courant formée d'une pile, ou d'une petite batterie d'accumulateurs que

ferment, une fois par minute, sur les horloges secondaires, un ou deux interrupteurs-inverseurs de groupes. Le mécanisme d'une horloge secondaire, qui est représenté dans la figure 279, a, comme organes principaux, deux armatures à 5 dents du système Favarger (p. 324) juxtaposées et dont les deux pignons engrènent avec une seule et même roue dentée centrale commandant la minuterie et les aiguilles. Cha-

que armature a son électro-aimant ; selon que c'est l'un ou l'autre de ceux-ci qui reçoit les émissions de courant alternées, les aiguilles tournent en avant ou en arrière sur le cadran.

Dans l'intérieur d'un fuseau horaire donné, où se trouve le navire, ce sont les émissions régulièrement espacées, envoyées à chaque minute par l'horlogemère, qui font tourner celle des deux armatures qui correspond à la marche en avant des aiguilles. Mais au moment où le navire entre dans le fuseau horaire suivant immédiatement celui qui vient d'être traversé, le surveil-

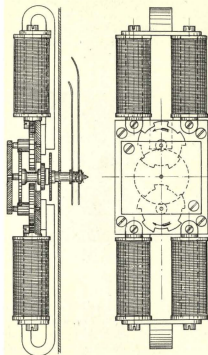


Fig. 279

lant que cela concerne isole, au moyen d'un commutateur approprié, les horloges secondaires de l'horloge-mère et envoie ensuite, par l'intermédiaire d'un renverseur de courant manœuvré à la main, des émissions de courant rapides soit dans ceux des électro-aimants secondaires qui font avancer les aiguilles, soit au contraire dans ceux qui

les font reculer. Il remet ainsi rapidement et simultanément toutes les horloges secondaires à l'heure du nouveau fuseau horaire, que celui-ci soit oriental ou occidental par rapport au fuseau déjà traversé. C'est un commutateur spécial à main qui permet au surveillant de diriger les émissions rapides soit sur l'un soit sur l'autre des deux électro-aimants, et la remise à l'heure une fois effectuée, de remettre toutes les horloges secondaires sous la dépendance des émissions régulières à minutes de l'horloge-mère. Les deux armatures de chaque horloge secondaire tournent toujours en sens inverse l'une de l'autre, celle dont l'électro-aimant est actif entraînant celle dont l'électro-aimant est passif, et cela par l'intermédiaire de la roue dentée centrale.

L'un des 24 fuseaux horaires terrestres ayant, à l'équateur, une largeur de 1666 kilomètres environ, distance qu'un vaisseau animé d'une vitesse de 45 à 47 kilomètres à l'heure, franchit en 36 heures à peu près, on voit qu'à la latitude des grands parcours transatlantiques, tels, par exemple, que celui de Southampton-New-York, la remise à l'heure du système horaire que nous venons de décrire, aura lieu une fois environ par 24 heures. Pour un autre parcours transatlantique plus long et coupant à angle plus aigu les fuseaux horaires, tel que celui de Southampton-Rio-de-Janeiro, cette remise à l'heure n'aura lieu que trois fois par voyage d'aller ou de retour.

Emploi du compteur électro-chronométrique comme horloge-mère. — Dans certains établissements scientifiques (observatoires, laboratoires d'universités, etc.), possédant un système d'unification de l'heure par compteurs électrochronométriques battant la seconde, il y a souvent intérêt à avoir en outre (dans les salles de cours, par exemple), une distribution de l'heure unifiée au moyen de cadrans dont les armatures battent la minute (ou la demi-minute). Dans ce cas, il suffit de munir l'un des compteurs battant la seconde d'un contact-inverseur qui, fermé une fois (ou deux fois) par minute par la roue d'échappement, actionne, avec l'aide d'une source de courant appropriée, le réseau des compteurs à minutes. Hipp et ses successeurs ont maintes fois réalisé de telles distributions à deux réseaux. Il y a lieu de remarquer ici que le contact à minute adapté à la roue d'échappement d'un compteur électrochronométrique de Hipp battant la seconde, ne présente aucun des inconvénients qui compromettent si souvent la bonne marche d'un contact analogue appliqué sans discernement à une horloge méca-

nique (ou à remontoir électrique) pourvue d'un échappement à ancre (comparer avec p. 289). L'armature polarisée d'un compteur Hipp possède en effet une force motrice qu'un enroulement judicieux de l'électro-aimant peut rendre bien supérieure à la portion de cette force qui est employée à la commande des seules aiguilles, et c'est alors l'excédent de cette force qui est à disposition pour n'importe quel autre travail mécanique supplémentaire.

Maintien à l'heure des horloges-mères.

Lorsque le nombre des appareils horaires secondaires unifiés ou à unifier dépasse certaines limites, ou bien lorsque l'étendue de la région sur laquelle ils sont répartis est considérable, ou bien encore lorsque le réseau horaire présente des points ou des zones à densité de répartition très variable, une horloge-mère unique ne suffit plus à les actionner tous directement, et l'on est obligé de constituer plusieurs *centres secondaires* d'unification ayant chacun son horloge directrice. Un régulateur central, installé le plus souvent dans un observatoire astronomique, est relié électriquement avec les centres secondaires et devient alors le *centre principal* d'unification.

Si donc nous voulons élucider dans toute sa généralité le problème qui nous occupe, nous avons à étudier maintenant les divers procédés que l'on peut employer pour maintenir à la même heure plusieurs horloges-mères.

Nous classerons ces procédés en 3 catégories principales.

Dans la première, c'est un employé spécial qui est chargé de ce service et il le fait en comparant quotidiennement la marche de l'horloge-mère secondaire dont il a la surveillance, avec celle de la pendule du centre principal, au moyen d'un appareil électromagnétique approprié, puis en corrigeant lui-même, à la main, l'écart soit en avance, soit en retard qu'a subi, depuis la veille, le balancier pendulaire de l'horloge-mère secondaire. Ce procédé n'est donc *pas automatique*.

Dans les deux autres catégories, le maintien à l'heure se fait *automatiquement* (sans l'intervention d'un surveillant), soit par *remise à l'heure*, soit par *synchronisation*.

Système non-automatique.

Lorsque c'est un employé qui est chargé du service du maintien à l'heure des horloges-mères secondaires, chacune de celles-ci doit être accompagnée d'un appareil électromagnétique qui soit capable de fournir, au moins une fois par jour, ou mieux encore à toute heure du jour, l'heure astronomique.

La nature et la construction de cet appareil dépendent, cela va de soi, de celles du régulateur du centre principal et son mode d'em-

ploi diffère suivant que ce centre envoie des émissions rares ou fréquentes. Dans le premier cas (émissions rares), la pendule dite à *coïncidences* de Hipp rend d'excellents services.

Cet instrument, que représente la figure 280, consiste en un mouvement d'horlogerie avec échappement mécanique à chevilles à coup perdu, réglé par un balancier (battant la demi-seconde) et mû par un ressort ou un poids. En temps ordinaire, ce balancier est accroché dans une position inclinée par la goupille demi-cylindrique d'un levier qui est lui-même retenu en position horizontale lorsque l'armature de l'électro-aimant n'est pas attirée par les pôles de celui-ci. Au moment où se produit l'émission de courant venant du centre principal, cette ar-

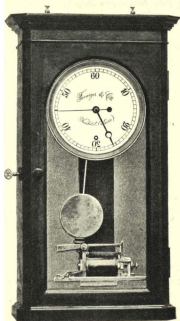


Fig. 280

mature se déplace, déclanche le levier, et le pendule, commençant à osciller, permet à une aiguille de secondes de parcourir son cadran, en indiquant ainsi le temps exact du régulateur central.

La longueur du pendule est telle que cette aiguille fait 61 sauts

par minute ; celle-ci *avance* donc d'une seconde à chaque minute et il se produit alors, entre ses battements et ceux de l'aiguille des secondes de l'horloge-mère secondaire à contrôler, des *coïncidences*, qui, comme une sorte de vernier acoustique, permettent d'apprécier les soixantièmes de seconde.

Lorsque les émissions du courant venant du régulateur central peuvent avoir lieu toutes les secondes, l'appareil électromagnétique accompagnant l'horloge-mère est muni d'un interrupteur à main qui permet de le relier instantanément avec la ligne venant du centre principal. Cet appareil peut, dans ce cas, être un simple téléphone, ou un électro-aimant à armature bruyante donnant à l'oreille la cadence des battements du régulateur central ; le contact de ce dernier est alors organisé de manière à ne pas expédier d'émission à la première seconde de chaque minute ; cette seconde muette sert ainsi de point de repère pour numérotter les autres.

Systeme par remise à l'heure.

Ici, le courant émis par la pendule du centre horaire principal n'intervient qu'à de rares intervalles (toutes les quatre, six, douze

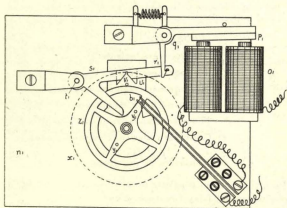
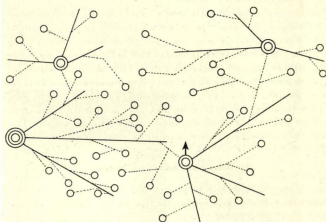


Fig. 281

ou vingt-quatre heures) pour remettre à l'heure les horloges-mères secondaires. Le problème, qui a beaucoup d'analogie avec celui déjà étudié au chapitre III sous lettre C_1 (p. 339), est rendu un

peu plus compliqué par le fait que ce n'est pas seulement la position des aiguilles de l'horloge-mère secondaire qui doit être corrigée, mais bien aussi celle du ressort de contact tournant des interrupteurs de groupes, ressort qui, dans la plupart des cas, et notamment



Légende.

- ⊙⊙⊙ Horloge-mère réglante
- ⊙⊙ Horloge-mère réglée
- ⊙⊙⬆ Horloge-mère réglée et réglante
- Fils principaux de groupe
- Fils secondaires d'embranchement
- Compteurs électro-chronométriques

Fig. 282

dans les horloges-mères à palette ordinaires de Hipp, est fixé sur la roue d'échappement faisant un tour en une minute.

La figure 281 représente le mécanisme de remise à l'heure que *Hipp* a adapté, en son temps, à ses horloges électriques à palette pour en faire des horloges-mères secondaires.

Sur la platine antérieure n_1 de ce mécanisme est fixé l'électro-aimant o_1 , dont l'armature plate en fer doux p_1 est fixée à la branche

supérieure d'un levier double pivoté en q_1 . Le crochet r_1 de la branche inférieure de q_1 retient une goupille demi-circulaire fixée à un autre levier double s_1 dont l'axe est en t_1 . A la branche supérieure du levier s_1 est adapté un petit bloc métallique u_1 muni d'une entaille triangulaire. Les parois en plans inclinés de cette entaille, sont assez ouvertes pour pouvoir atteindre, lorsque r_1 laisse échapper s_1 , la goupille v_1 tournant avec la roue d'échappement x_1 de l'horloge-mère secondaire, et la remettre ainsi à l'heure de la pendule centrale quand celle-ci, en envoyant son émission correctrice, rend actif l'électro-aimant o_1 . Mais cette émission qui, avec l'espèce de pendule centrale employée par Hipp, a lieu une fois par minute, ne peut entrer qu'une fois par heure (ou par 6, 12, etc., heures) dans l'électro-aimant correcteur o_1 , grâce au contact préparatoire à deux ressorts fixes b_1 que ferme aux moments voulus (ici toutes les six heures) l'une ou l'autre des deux goupilles diamétrales fixées sur la roue z_1 faisant un tour en 12 heures. Il résulte de ce qui précède que l'horloge-mère secondaire ici décrite peut être intercalée, comme un compteur électrochronométrique quelconque de Hipp ou de Favarger, sur un réseau de distribution d'heure à minutes. L'ouverture de l'entaille du bloc u_1 est telle que l'horloge-mère secondaire peut retarder ou avancer de 5 secondes pendant les six heures séparant deux remises à l'heure consécutives, sans que le jeu normal de ces dernières soit compromis. Or, un écart de plus de 5 secondes en 6 heures ne se produit jamais avec une horloge électrique à palette de Hipp, lorsque son balancier est bien réglé.

La figure 282 donne une idée approximative de la grande variété de combinaisons que l'on peut obtenir avec le procédé ci-dessus. Les horloges-mères secondaires, ainsi équipées, deviennent de véritables translateurs, et c'est précisément là le nom qui leur a été donné par Hipp (horloges-mères à translation).

Système par synchronisation.

On utilise, dans ce système, la méthode décrite au chapitre III, sous lettre C_2 (p. 342). Le régulateur central, muni du contact-interrupteur provoquant les émissions du courant synchronisateur, commande les balanciers des horloges-mères secondaires qui battent ainsi tous à l'unisson avec le sien.

Les conditions d'un succès durable dans l'une ou l'autre des diverses solutions pratiques qui ont été données du problème de la

synchronisation électrique de plusieurs balanciers pendulaires, sont les suivantes :

1^o Le contact-interrupteur de la pendule directrice doit être construit de façon à n'influencer en rien la marche correcte de cet instrument, qui est très souvent une pendule de haute précision pour observatoire.

2^o Ce contact doit être réglable comme instant et durée de chaque émission, et cela au moyen de vis à pas très fin permettant des déplacements micrométriques de ses organes fixes et mobiles.

3^o L'armature oscillante et l'électro-aimant synchronisateur à placer, la première sur la tige du balancier synchronisé, le second dans le voisinage plus ou moins immédiat de la première, doivent être, eux aussi, réglables, afin de permettre de trouver rapidement la position la plus favorable qu'ils sont susceptibles d'occuper, soit par rapport à la ligne verticale passant par le point de suspension du balancier, soit comme distance d'entrefer entre armature et pôles.

4^o L'intensité du courant synchronisateur, son voltage et la résistance d'enroulement de chacun des électro-aimants récepteurs doivent être choisis de manière à être le mieux possible en harmonie soit avec le mode d'intercalation adopté (en dérivation, en série, mixte), soit avec les distances à franchir d'une pendule synchronisée à l'autre, soit avec le nombre et les situations de celles-ci, soit enfin avec le type de fil de ligne imposé ou choisi.

5^o Il y a lieu de tenir compte du mode d'entretien (mécanique ou électrique), qui a été choisi ou imposé, aussi bien pour le balancier de la pendule directrice que pour ceux des pendules secondaires. On comprend facilement, en effet, que le balancier à seconde d'une pendule munie d'un échappement mécanique à ancre ou à cheville, se trouve, au point de vue synchronisation, dans des conditions quelque peu différentes de celles qui conviennent au balancier d'une horloge-mère électrique à palette de Hipp, par exemple, n'ayant pour tout rouage qu'un rochet faisant un tour en deux minutes (p. 358).

Lorsque les conditions que nous venons d'énumérer sous 1^o, 2^o, 3^o, 4^o et 5^o ci-dessus, sont remplies, on peut obtenir la synchronisation durable de plusieurs balanciers d'horloges-mères secondaires par celui d'une horloge directrice, non seulement lorsque tous les balanciers, aussi bien le directeur que les dirigés, ont la même longueur ou, mieux dit, la même période, mais aussi lorsque la période d'un ou de plusieurs des balanciers dirigés, est un sous-

multiple ou un multiple convenable de la période du balancier directeur. Rien de plus facile, par exemple, que de synchroniser plusieurs balanciers battant la demi-seconde au moyen d'une pendule directrice dont le balancier bat la seconde.

La *fréquence* plus ou moins grande des émissions synchronisantes joue aussi, cela va de soi, un rôle important. Lorsque cette fréquence est faible, par exemple de seulement une émission par minute, on peut arriver à d'excellents résultats pratiques, à condition que la puissance réglante de chaque émission soit toujours supérieure à l'écart maximum que l'un quelconque des balanciers synchronisés pourrait offrir, en degrés d'arc, au bout d'une minute de marche autonome. Or, cet écart lui-même dépend de divers facteurs dont les principaux sont :

a) les *résistances mécaniques* plus ou moins grandes et surtout plus ou moins constantes, que le balancier synchronisé a à vaincre pour effectuer le travail utile que l'on attend de lui.

b) les *perturbations* plus ou moins grandes que le mode d'entretien (mécanique ou électrique) du balancier synchronisé, peut apporter dans la marche de ce dernier.

c) l'*amortissement* naturel (résistance du milieu dans lequel le balancier oscille ou des organes qu'il actionne, etc.) ou artificiel (frein électromagnétique ou tout autre dispositif analogue), que subit ce même balancier synchronisé.

d) les *fermetures* plus ou moins précises, en instants et en durées, du contact-interrupteur de la pendule directrice.

e) la *constance* plus ou moins grande de l'intensité du courant synchronisateur.

En étudiant successivement l'influence qu'exerce chacun des divers facteurs a), b), c), d) et e) ci-dessus, on constate que l'expérimentateur a en mains la possibilité de réagir sur eux, c'est-à-dire de les choisir ou de les modifier de telle manière qu'ils soient ou deviennent le plus favorables possible à l'établissement d'une synchronisation durable.

Lorsque, par suite de considérations étrangères au côté technique du problème, on ne peut adopter la fréquence d'une seule émission par minute ou que cette fréquence, par suite d'une trop grande sensibilité des pendules synchronisées aux perturbations de diverse nature signalées tout à l'heure, est décidément trop faible, il faut recourir à des fréquences plus élevées de 2, 3, 4, 6, etc., 30 et même 60 émissions synchronisatrices par minute. Ces deux dernières fré-

quences sont très souvent adoptées parce qu'elles peuvent être produites par un contact-interrupteur fermé directement, toutes les deux secondes ou toutes les secondes, par le balancier même de la pendule directrice, sans l'intervention d'un contact auxiliaire à plus longue période, fermé par un mobile approprié du rouage soit de la directrice, soit des dirigées.

Il est à peine besoin de remarquer ici que plus la fréquence adoptée est faible, plus l'intensité du courant de chaque émission synchronisante doit être grande, en sorte que, pour une installation donnée, le quotient $\frac{\text{fréquence}}{\text{intensité}}$ sera approximativement une constante.

Relais pendulaire de la maison Favarger & C^{ie} à Neuchâtel.

— Nous avons déjà parlé de cet instrument (p. 264) ; le moment est venu d'en faire la description détaillée, puisque, aussi bien, il n'est autre chose qu'une horloge-mère secondaire à balancier, synchronisée par une pendule directrice de haute précision.

La préoccupation qui a conduit à l'invention de l'appareil auquel ses constructeurs, MM. Wälti et Abegglen, tous deux techniciens de la maison suisse que nous venons de mentionner, ont donné le nom de *relais pendulaire*, a été celle de remédier à l'inconvénient que présente toute pendule de précision munie de l'interrupteur-inverseur à secondes de Hipp, inconvénient qui, ainsi que nous l'avons vu à page 246, consiste en ce que la pendule *avance* ou *retarde* lorsque l'intensité du courant passant par le dit interrupteur diminue ou augmente. La valeur de la variation de marche est de l'ordre d'un dixième de seconde en 24 heures par milliampère intercalé ou désintercalé dans le circuit de l'interrupteur (comparer aussi avec page 258).

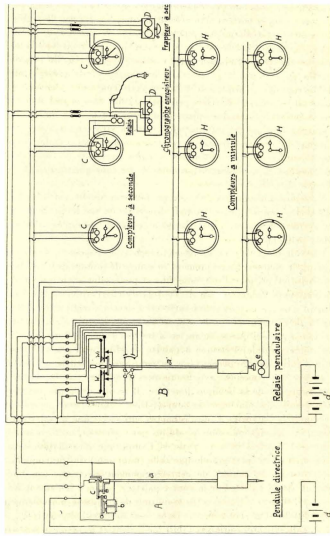
Cet inconvénient a été éliminé en intercalant entre la pendule de précision et les appareils d'utilisation qu'elle doit commander (compteurs électrochronométriques battant la seconde, chronographes enregistreurs, etc.), un instrument intermédiaire, le relais pendulaire précisément, ayant pour but et pour effet de décharger la pendule, aussi bien électriquement que mécaniquement, de toute la partie du travail qui est nécessitée par la mise en jeu de ces appareils d'utilisation.

La pendule directrice est alors munie d'un simple interrupteur non-inverseur, qui est fermé toutes les deux secondes et qui n'a plus à livrer passage qu'à un faible courant d'intensité constante

dont l'unique fonction est d'entretenir les oscillations des deux balanciers ; ceux-ci battent à l'unisson. En d'autres termes, le régime électrique et mécanique, auquel est soumise la pendule de haute précision, est *invariable* dans la mesure où le circuit électrique primaire du relais pendulaire est lui-même constant. Or, les progrès réalisés en matière de générateurs de courant et de préservation de l'interrupteur, permettent d'obtenir cette constance. Par contre, le circuit secondaire du relais pendulaire, celui dans lequel sont ou seront intercalés tous les appareils d'utilisation actuels ou futurs, à marche continue ou intermittente, pourra être soumis à des variations de régime (électriques et mécaniques) très grandes, sans que soient, de ce fait, influencées le moins du monde les conditions de fonctionnement du circuit primaire et par conséquent celles de la pendule directrice elle-même.

La figure schématique 283 ci-après fait voir quelle est la disposition très simple d'une pendule directrice de haute précision *A* du système Froment, type Abegglen (p. 264), accouplée avec son relais pendulaire *B*.

On voit en *a*, *b*, *c* et *d*, respectivement le balancier, l'électro-aimant, le contact-interrupteur et la source de courant de la pendule directrice *A* ; *b*, *c* et *d* ont pour but et pour effet d'entretenir les oscillations du balancier *a* de *A*. Toutefois, en dérivation sur l'électro-aimant *b* de *A*, se trouve aussi intercalé l'électro-aimant *e* du balancier *a'* de *B* ; *c* entretient donc aussi les oscillations de *a'*. Il y a lieu de remarquer ici que le balancier *a'* de *B* n'a pas, comme dans le cas d'une pendule électrique à palette de Hipp, son propre dispositif d'entretien lui permettant de continuer à osciller même en l'absence des émissions synchronisantes produites par le contact-interrupteur *c* de la pendule directrice. Il résulte de là que ces dernières émissions sont *motrices* pour *a'*. Rien n'empêcherait cependant de munir le balancier *a'* de l'échappement électrique à palette de Hipp, et alors les émissions produites par *c* seraient, ou bien simultanément *motrices et correctrices*, si l'amplitude d'oscillation de *a'* est normalement plus grande que celle (minimum) qui provoquerait la fermeture du contact de cet échappement électrique (arc-boutement de la palette sur la contre-palette), ou bien seulement *correctrices*, si, au contraire, cette amplitude de *a'* dépasse normalement l'amplitude d'arc-boutement. Dans ces diverses alternatives, le régime de synchronisation s'établit facilement et les deux balanciers battent à l'unisson, avec un léger décalage de *B* sur *A* que l'expé-



rimentateur peut, au moyen des diverses vis de réglage des deux instruments, rendre aussi petit que cela sera jugé utile. Une autre remarque intéressante à faire ici, c'est que, lorsque les émissions lancées par c dans l'électro-aimant e de B sont purement et normalement motrices, le balancier a' de B part automatiquement de la position de repos, pour atteindre, en quelques minutes, le régime de marche synchronisée et l'amplitude correspondante.

Près de la suspension du balancier a' du relais pendulaire B , se trouve le contact-inverseur ww_1 chargé de lancer, à chaque demi-période, dans les appareils d'utilisation C et D battant la seconde, des émissions alternativement renversées ; ww_1 constitue ainsi, avec ces appareils et avec la source de courant d' , le circuit secondaire du relais B .

Le contact ww_1 consiste, non pas en lamelles triples touchées alternativement à droite et à gauche de la suspension de a' par deux bras platinés oscillant avec le balancier, mais bien en deux jeux de robustes ressorts à forte pression de contact, qui permettent de livrer passage aux intensités de courant relativement considérables et le plus souvent *variables* (à cause des chronographes enregistreurs à marche intermittente), qui doivent parcourir le circuit secondaire de B . Grâce à la dépendance absolue et quasi imperturbable, où le balancier synchronisé a' se trouve, vis-à-vis du balancier synchronisant a , grâce en outre à la grande force vive contenue dans la masse lenticulaire de a' dont le poids est de 8 à 10 kg. et qui constitue un véritable *volant* capable de surmonter, sans en être perturbé, les petites variations de résistances mécaniques qui pourraient, çà et là, affecter le relais pendulaire, on obtient facilement les pressions de contact assurant largement le fonctionnement des appareils d'utilisation.

La puissance réglante des émissions du courant synchronisateur lancées toutes les deux secondes, par le contact c de A dans l'électro-aimant de B , s'est révélée si grande en pratique que le balancier a' du relais B a pu être chargé, en plus de la commande du contact-inverseur à seconde ww_1 , d'actionner mécaniquement, au moyen d'un encliquetage approprié et des rouages connus (comparer avec p. 237 et suiv.), les aiguilles d'heures, de minutes et de secondes, dont la pendule directrice A est elle-même dépourvue. Si donc on veut connaître à tout instant l'heure qui convient à cette dernière, autrement dit l'heure correspondant au nombre d'oscillations effectuées par les deux pendules a et a' depuis la dernière mise au

point, il suffit de consulter le cadran du relais pendulaire, cadran dont les aiguilles doivent d'ailleurs être en concordance parfaite avec celles des compteurs électrochronométriques, battant la seconde, que commande électriquement le contact-inverseur $\omega\omega_1$ de *B*. Enfin le mécanisme d'horlogerie, placé derrière le cadran du relais, peut être muni de contacts-inverseurs de groupes pour compteurs électrochronométriques *H* battant la minute et alors le relais pendulaire devient une horloge-mère secondaire capable d'actionner *simultanément* deux systèmes d'appareils d'utilisation, l'un où ceux-ci battent la seconde et l'autre où ils battent la minute. On atteint ainsi, par un autre procédé, le résultat déjà signalé à pages 389 et 390. Une telle installation horaire à double effet rend de précieux services dans les observatoires, dans les laboratoires scientifiques ou industriels, dans les fabriques de montres de précision et en général dans tous les établissements où il est nécessaire de distribuer l'heure exacte à une petite fraction de seconde près, soit à des expérimentateurs (savants, ingénieurs, régulateurs, etc.), soit à des travailleurs (employés de bureaux, auditeurs de cours universitaires, ouvriers d'ateliers, etc.), auxquels il suffit de connaître cette même heure exacte, au moyen de cadrans secondaires battant la minute. Le relais pendulaire à double effet de la maison Favarger & C^{ie} a un aspect extérieur analogue à celui que représente la figure 164 de la page 236 du présent ouvrage.

Une pendule directrice peut actionner plusieurs relais pendulaires intercalés, soit en dérivation, soit en série sur son interrupteur *c*. D'autre part, chaque relais peut, à son tour, synchroniser un certain nombre d'autres relais pendulaires, dits « de second ordre »; ces derniers pouvant eux-mêmes actionner des relais « de troisième ordre », et ainsi de suite, on peut étendre indéfiniment le rayon d'action de la pendule directrice centrale.

Système mixte.

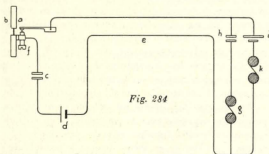
Un système mixte, tenant à la fois de la synchronisation et de la remise à l'heure, a été imaginé par l'auteur de ces lignes pour maintenir à la même heure plusieurs horloges-mères au moyen d'un régulateur central. Voici les conditions auxquelles il satisfait :

1^o L'horloge-mère, du type électrique inventé par Hipp, est une pendule à demi-seconde, dans laquelle les émissions du courant synchronisateur n'ont lieu que toutes les minutes (ch. III), ce qui

permet l'emploi d'une pile peu constante, et nécessite une dépense de courant relativement faible.

2^o Le régime normal est celui où le pendule de l'horloge réglée bat à l'unisson avec celui de l'horloge réglante, autrement dit, où il y a synchronisation. Mais si, pour une raison quelconque, ce régime normal est troublé, l'horloge réglée y revient automatiquement, et cela aussi souvent que les perturbations se répètent. La suppression du courant synchronisateur pourrait même durer une journée entière sans compromettre le retour au synchronisme.

3^o Enfin, dans le cas d'une suppression complète et permanente



du courant réglant, l'horloge-mère continuera à fonctionner seule avec un léger retard que l'expérience a appris pouvoir être de huit à dix secondes au plus par vingt-quatre heures.

Voici comment cet appareil est construit :

Il est du type décrit à pages 232 et suivantes. Il possède le renverseur de courant et les interrupteurs de groupe qui en font une horloge-mère capable d'actionner cent, deux cents et même trois cents cadrans. L'électro-aimant chargé d'entretenir le mouvement du balancier avec l'aide de l'échappement électrique, reçoit lui-même les émissions du courant synchronisateur ; celles-ci sont produites par le pendule même de l'horloge réglante, et elles ont une durée très courte.

L'interrupteur qui les fournit est lui-même double, et consiste d'une part en un premier contact *a* (fig. 284) adapté à la suspension *b* du pendule réglant et fermé toutes les secondes, d'autre part en un second contact *c* qui est semblable aux interrupteurs de groupe des horloges-mères, et qui n'est fermé qu'une fois par minute, au

moment précis où l'aiguille des secondes de l'horloge réglante arrive au zéro du cadran. C'est seulement lorsque ces deux contacts sont fermés ensemble que le courant de la pile *d* de synchronisation peut circuler dans la ligne *e* ; *c* règle donc la fréquence des émissions et *a* (au moyen de la vis *f*) leur durée.

L'électro-aimant *g* de l'horloge réglée n'est pas directement en relation avec la ligne *e* ; celle-ci passe auparavant par un interrupteur *h* semblable au contact *c* de l'horloge réglante, et fermé de la même manière et au même moment. On comprend alors que si les pendules des deux horloges battent exactement à l'unisson, et si les aiguilles de secondes arrivent au même instant au zéro de leurs cadrans, le courant fermé en *a* trouvera les deux contacts *c* et *h* fermés, et, par conséquent, pourra circuler dans l'électro-aimant *g* et maintenir ainsi le synchronisme.

La position de cet électro-aimant, par rapport à l'armature du pendule réglé, est telle que la condition du synchronisme n'est remplie que si le pendule réglé a, sur le pendule réglant, une tendance légère à retarder. Il résulte de là que si l'on place l'aiguille des secondes de l'horloge réglée en *avance* sur celle de l'horloge réglante, et que, par suite, on supprime ainsi la possibilité, pour le courant synchronisateur, de circuler (puisque alors les deux contacts *c* et *h* ne peuvent plus être fermés en même temps), le pendule réglé retardera sur le pendule réglant jusqu'à ce que, les deux aiguilles des secondes étant de nouveau en concordance, le courant réglant ait pu recommencer à circuler et maintienne de nouveau les pendules à l'unisson.

Pour obtenir également le retour automatique au synchronisme lorsqu'il y a *retard* de l'aiguille à secondes de l'horloge réglée, l'auteur a placé derrière son mouvement un second électro-aimant *k* dont l'armature commande un dispositif de remise à l'heure ; *k* est en communication avec un nouvel interrupteur ou contact *i* adapté à la roue d'échappement de l'horloge réglée, qui ne peut être fermé qu'aussi longtemps que l'aiguille des secondes de cette horloge n'est pas au zéro, et qui a une durée égale au nombre de secondes dont l'horloge réglée retarde par vingt-quatre heures sur l'horloge réglante, lorsque le courant synchronisateur ne l'influence pas.

On comprend que cette disposition a pour effet de lancer l'émission venant chaque minute de l'horloge réglante dans l'électro-aimant *k* de remise à l'heure, toutes les fois que l'aiguille des secondes de l'horloge réglée est en retard sur l'autre.

Le mécanisme de remise à l'heure est disposé de la manière suivante :

Lorsque l'électro-aimant k n'est pas actif, les aiguilles et le doigt de contact des interrupteurs de groupes fonctionnent normalement, c'est-à-dire que les uns parcourent régulièrement les divisions du cadran, et que l'autre fournit à la fin de chaque minute les émissions actionnant les compteurs électrochronométriques. Mais, au moment où l'armature de k est attirée sous l'influence du courant venant du régulateur central, elle réagit sur les rouages, de manière à communiquer aux aiguilles et au doigt de contact une vitesse double, en sorte que le moment ne se fait pas attendre où l'accord entre l'horloge réglée et l'horloge réglante se rétablit, et où, par conséquent, les émissions du courant du régulateur central peuvent reprendre leurs fonctions synchronisatrices.

L'émission envoyée par l'horloge réglante étant de courte durée, l'attraction correspondante de l'armature de k ne durera pas assez longtemps pour qu'un retard de plusieurs secondes puisse être corrigé d'une seule fois ; mais cet inconvénient est négligeable, car il est peu important que la remise à l'heure s'effectue en une seule minute ou en plusieurs minutes consécutives. On pourrait d'ailleurs adopter un dispositif mécanique tel que la vitesse double persistât aussi longtemps que l'aiguille des secondes n'est pas d'accord avec celle de l'horloge réglante.

L'interrupteur i ouvrant passage à l'émission du courant sur l'électro-aimant de remise à l'heure k , pourrait avoir une longueur au moins égale à la moitié d'une minute, afin que les chances de retour au synchronisme fussent aussi grandes que possible.

Toutefois, en pratique, il est parfaitement suffisant que cette longueur soit de huit à dix secondes, temps correspondant au retard qui se produirait dans l'horloge réglée, si le courant synchronisateur était supprimé pendant vingt-quatre heures consécutives. En effet, un retard dépassant cette limite est purement accidentel et peut être corrigé à la main.

Chacun des systèmes de maintien à l'heure des horloges-mères secondaires, tels que nous venons de les passer en revue, a ses avantages et ses inconvénients ; on choisira, dans chaque cas donné, celui qui s'adapte le mieux aux circonstances locales de l'établissement, de la ville ou de la région qu'il s'agit de munir d'une installation d'heure unifiée.

Lorsque les distances qui séparent les horloges-mères secondaires du centre horaire principal sont grandes et que par suite il serait trop coûteux d'installer des lignes exclusivement réservées au service horaire, on emploie avec avantage le système non-automatique (par horloges à coïncidences), qui ne met la ligne à contribution qu'une fois par 24 heures et pendant quelques minutes seulement ; cette ligne reste alors disponible, pendant tout le reste de la journée, pour tout autre service (télégraphique, téléphonique, etc.). Par contre le système non-automatique nécessite la présence, à chaque station secondaire, d'un employé contrôleur.

Le système par synchronisation est très exact puisque les balanciers de toutes les horloges battent continuellement à l'unisson et il n'exige pas, normalement, l'intervention d'employés, puisqu'il est automatique. D'autre part, il nécessite, le plus souvent, des lignes spéciales ne pouvant guère faire qu'exceptionnellement un autre service simultané.

Le système par remise à l'heure est un peu moins exact et précis que celui par synchronisation ; par contre il présente l'avantage de la faible fréquence des émissions lancées par le centre horaire principal et se rapproche, à ce point de vue, du système par horloges à coïncidences, tout en permettant la suppression des employés contrôleurs¹.

Ici, nous devons remettre en mémoire du lecteur l'observation

¹ Les progrès qui ont été récemment réalisés en matière de transmission simultanée, par un seul et même fil électrique, de plusieurs espèces de signaux (télégraphiques, téléphoniques, horaires, etc.) et dans le détail desquels nous ne pouvons entrer ici, permettent d'espérer que, tôt ou tard, on arrivera à se servir couramment, pour l'envoi à grandes distances d'émissions horaires plus ou moins fréquentes, de lignes déjà affectées à d'autres services.

Il y a lieu en outre de remarquer que dans les villes et régions où le réseau des fils téléphoniques urbains est en majeure partie souterrain, l'administration (publique ou privée) qui l'exploite a, dans chacun de ses câbles, des fils ou des « lacets » de réserve qu'elle a le plus souvent un avantage économique à louer, moyennant une redevance annuelle relativement minime, à l'administration (publique ou privée) qui est chargée du service de distribution de l'heure.

Enfin, il est intéressant de noter ici qu'un ingénieur suisse, *M. Straumann*, a fait breveter récemment un système d'appareils qui permet d'obtenir la remise à l'heure automatique d'une pendule de précision Favarger & Cie, au moyen des émissions horaires qu'une station radiotélégraphique telle, par exemple, que celle de la Tour Eiffel à Paris, lance, tout autour d'elle, jusqu'à des centaines de kilomètres de distance. Le système Straumann-Favarger & Cie est en activité, depuis plus d'une année, dans une fabrique de pièces de précision du nord de la Suisse. Nous reviendrons au chapitre X sur cette invention, qui, ainsi qu'on peut déjà le pressentir, résout le problème de la distribution automatique de l'heure exacte et unifiée, non pas seulement dans une grande ville, mais dans tout un pays et même dans tout un continent.

que nous avons déjà faite à la page 170 du présent ouvrage, à savoir qu'un système vraiment universel d'unification de l'heure peut et doit pouvoir embrasser, simultanément, des appareils transmetteurs et récepteurs reposant sur les trois principes différents des émissions motrices, correctrices et déclancheuses, sans que, de ce fait, on risque d'introduire des éléments de désharmonie ou de perturbation, empêchant l'ensemble (ou des parties de l'ensemble) de fonctionner correctement.

Description de quelques systèmes plus ou moins étendus d'heure électriquement unifiée.

Dans les chapitres précédents nous avons étudié les différentes parties qui composent un système d'unification de l'heure par l'électricité. Il nous reste à montrer quel est le jeu d'ensemble des organes décrits plus haut et à faire voir comment chacun d'eux concourt au but commun.

Pour donner plus d'intérêt à ces lignes nous procéderons par voie d'exemples.

A. Système dont le centre général est l'Observatoire de Neuchâtel.

Cette installation, commencée en 1863, a été réorganisée en 1876. Elle est allée depuis lors en s'agrandissant et a desservi entre autres, pendant près d'un demi-siècle, et dessert encore aujourd'hui les principaux centres horlogers de la Suisse occidentale. Elle fut à l'origine le résultat de la collaboration de feu Hipp, alors directeur de la Fabrique de télégraphes et appareils électriques de Neuchâtel, et du D^r Hirsch, directeur, quand il vivait, de l'observatoire de cette même ville¹.

Comme le service pratique de cet établissement scientifique con-

¹ L'auteur a reproduit ici sans changement essentiel, les textes et les schémas concernant cette installation, tels qu'ils figuraient dans la seconde édition française (1892) du présent ouvrage. Il y a eu, depuis lors, quelques modifications dans son organisation. Toutefois ces modifications, qui n'ont porté que sur des points de détail, tels que : remplacement des piles primaires par des accumulateurs, changement de tracés de certaines lignes, suppression des signaux de retour des stations d'horloges à coïncidences, etc., ne touchent en rien au principe même sur lequel a été basée, dès le début, cette distribution à distance de signaux horaires exacts. L'auteur estime d'ailleurs qu'il y a intérêt, au point de vue historique, à conserver intactes la description et les figures de l'édition de 1892; elles concernent en effet une organisation qui a rendu (et rend encore aujourd'hui) les

siste, d'une part dans l'observation et le contrôle des montres de précision fabriquées dans les montagnes neuchâteloises, d'autre part dans la transmission de l'heure astronomique, il est pourvu de tous les instruments nécessaires à une détermination, aussi exacte que possible, de cette heure.

Il est relié électriquement avec les localités suivantes, toutes pourvues d'une horloge à coïncidences de Hipp pareille à celle qui a été décrite à page 392 :

Neuchâtel-Ville, la Chaux-de-Fonds, le Locle, les Brenets, les Ponts, Couvet, Fleurier, Sainte-Croix, le Brassus, le Sentier, Bienne, Saint-Imier, Bureau central des télégraphes à Berne.

Les plus importantes de ces stations possèdent, à côté du poste d'horloge à coïncidences relié avec l'observatoire, une horloge-mère à déclenchement de Hipp (décrite à p. 360 et suiv.). Celle-ci est reliée au moyen de fils de groupes et de leurs dérivations avec un ensemble complet d'appareils horaires de toute espèce, et surtout de compteurs électrochronométriques dont les armatures polarisées (Hipp ou Favarger) battent la minute et qui sont répartis dans les rues, carrefours, places publiques, bureaux, fabriques, écoles, hôtels, etc., de la ville constituant le centre secondaire correspondant.

L'heure reçue de Neuchâtel par le Bureau central des télégraphes, à Berne, a été en outre transmise chaque jour à toutes les stations de chemin de fer et à tous les bureaux de postes et télégraphes de la Suisse, en sorte qu'en fait l'action de l'observatoire de Neuchâtel, comme centre général de distribution de l'heure civile exacte, s'est étendue, jusqu'à il y a peu de temps¹, sur tout le territoire de la Confédération suisse, englobant ainsi les réseaux d'horloges électriques des villes de Berne, Bâle, Zurich, Lucerne, Saint-Gall, Lausanne, etc., et de toutes les gares importantes des chemins de fer suisses (Aarau, Baden, Bellinzzone, Brigue (Simplon), Brugg, Coire, Glaris, Goldau, Göschenen, Gossau, Lugano, Montreux, Olten, Romanshorn, Saint-Maurice, Schaffhouse, Soleure, Vevey, Winterthour,

plus signalés services à l'industrie suisse des montres de précision et qui a fortement contribué à amener celle-ci au degré de perfection où elle se trouve, degré que les récents travaux et découvertes de M. Ch.-Ed. Guillaume, directeur du Bureau international des poids et mesures et lauréat du Prix Nobel, élèveront encore considérablement (voir sa brochure intitulée : *La Compensation des horloges et des montres, procédés nouveaux basés sur l'emploi des aciers au nickel*. Neuchâtel et Genève, 1921, éditions Forum).

¹ Aujourd'hui ce sont les signaux horaires de la tour Eiffel (et par conséquent l'heure déterminée par l'observatoire de Paris) qui permettent au Bureau de Berne de transmettre indirectement l'heure exacte à toute la Suisse.

Zoug, etc., plus, cela va de soi, les grandes gares de Bâle, Berne, Lausanne, Lucerne, Saint-Gall, Zurich).

Le nombre des appareils horaires électriques des systèmes Hipp et Favarger, ainsi unifiés en Suisse, est de plusieurs milliers et comprend entre autres des cadrans de tous diamètres (depuis 0^m10 à 10^m) et de toute espèce (publics, particuliers, intérieurs, extérieurs, éclairés ou non pendant la nuit, à simple et à double face, avec ou sans signaux de sonneries, etc.).

Les fils électriques reliant l'observatoire de Neuchâtel avec les diverses stations d'horloges à coïncidences du Jura horloger, sont des lignes télégraphiques de l'État, affectées les unes d'une manière permanente, les autres momentanément, à la transmission du signal d'heure. Celle-ci s'effectue automatiquement par l'intermédiaire d'une pendule électrique, à une heure convenue d'avance, qui est basée elle-même sur le temps du fuseau horaire de l'Europe centrale.

Nous examinerons successivement :

a) L'organisation du centre général de l'observatoire (telle qu'elle existait en 1876) ;

b) Celle du centre secondaire de Neuchâtel-Ville.

a) Centre général.

Les instruments qui participent à la transmission du signal d'heure sont :

a) La pendule électrique dont il vient d'être question et qui, une fois remise à l'heure d'après les observations astronomiques, provoque l'envoi dans les lignes aboutissant aux stations d'horloges à coïncidences, de quatre émissions de courant, séparées l'une de l'autre par un intervalle d'une minute et enregistrées en même temps sur la bande de papier d'un chronographe de Hipp.

b) Une table de transmission (fig. 285) comprenant les appareils suivants :

1^o Un relais *a*, dont les bobines sont parcourues par les quatre émissions successives de la pendule électrique, et qui ferme à son tour deux contacts dont l'un, *k*, fait circuler le courant de la pile générale de transmission dans la ligne Neuchâtel-Ville-Chaux-de-Fonds-Loche-Brenets-Ponts-Couvét-Fleurier-Sainte-Croix-le Sentier-le Brassus, et dont l'autre, *l*, rend le même service à la ligne Bienne-Saint-Imier.

2° Sur chacune des lignes un galvanomètre b et b' pour contrôler l'intensité du courant de ligne.

3° Une boîte de résistance c permettant, au moyen du manipulateur g et de l'interrupteur f , de contrôler l'état de la pile générale du signal.

4° Un récepteur télégraphique Morse d (aujourd'hui supprimé, voir la note du bas de la page 408), sur lequel on reçoit successivement, à des minutes convenues, les signaux de réponse de chacune des stations, signaux qui sont destinés à renseigner l'observatoire au sujet

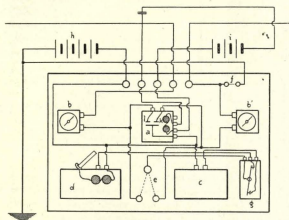


Fig. 285

du succès de l'expédition du signal d'heure et, par suite, à faciliter la recherche immédiate d'un ou de plusieurs défauts éventuels du système.

5° Un commutateur e permettant, avec l'aide du manipulateur g , d'intercaler à la main successivement les deux lignes sur la pile générale et de s'assurer ainsi du bon état de leur isolation.

6° Un interrupteur f , au moyen duquel, avec l'aide du manipulateur g , on peut fermer le courant de la pile générale directement sur la boîte de résistances c et le galvanomètre b' .

c) Une pile h pour la transmission du signal d'heure (cette pile est remplacée aujourd'hui par une batterie d'accumulateurs de 120 volts et de 5 ampères-heures).

d) Une pile i pour les bobines du relais a .

La figure 285 donne le plan général des communications reliant ces appareils entre eux. Quant à la figure 286, elle fait voir quel est le schéma des diverses stations d'horloges à coïncidences qui existaient en 1876. Les électro-aimants a de ces horloges sont placés en dérivation sur les deux lignes l et l' venant de l'observatoire. Il a donc fallu équilibrer le système au moyen des résistances additionnelles r , calculées d'après la méthode connue et en

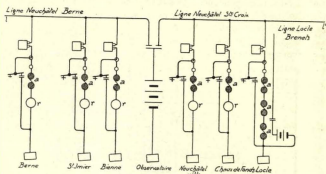


Fig. 286

tenant compte des longueurs de lignes séparant les stations entre elles et celle de l'observatoire. Ainsi que nous l'avons déjà dit dans notre note de la page 408, des changements dans le tracé des lignes effectués récemment et l'adjonction de nouveaux postes secondaires ont obligé à modifier quelque peu le schéma de la figure 286, qui reste cependant juste dans son principe.

b) Centre secondaire de Neuchâtel-Ville.

Le réseau primitif des horloges électriques de la ville de Neuchâtel fut installé par Hipp en 1864. Son horloge-mère, calculée pour actionner un petit nombre de cadrans secondaires répartis dans diverses rues et places publiques du centre de la ville, fonctionna jusqu'en 1876 dans les bureaux de la Fabrique de télégraphes. La figure 287 à l'échelle de $1/16^{\text{me}}$ en donne l'aspect extérieur. Ce premier réseau ne devint la propriété définitive de la municipalité d'alors qu'après un temps d'épreuve de deux années, dont il sortit victorieusement. Il ne comprenait à l'origine que 16 compteurs

électrochronométriques du système Hipp à armatures polarisées.

En 1876, la centrale horaire fut transportée à l'Hôtel de ville et son horloge-mère, devenue insuffisante, remplacée par une autre à plus grande capacité qui est encore aujourd'hui en pleine activité. La figure 288 en donne la vue de devant et la figure 289 le schéma des communications intérieures reliant entre eux et avec les fils extérieurs de groupes, les divers instruments dont cette centrale se compose. Ces instruments sont :

a) Une horloge-mère à déclenchement de Hipp dont l'appareil à contacts *a* (fig. 289) a six interrupteurs de groupes.

b) Un commutateur dit « de direction » *C*, permettant de relier les fils de groupes $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6$, les deux fils P, P' de la source de courant f des compteurs électrochronométriques et le fil de retour commun T (ou la terre), tantôt avec l'horloge-mère principale *a* (ici celle à déclenchement), tantôt avec une horloge-mère de réserve (non représentée sur les fig. 288 et 289), tantôt enfin avec un renverseur de courant et 6 interrupteurs de groupes à main, au moyen desquels on peut remettre à l'heure simultanément les compteurs secondaires d'un ou de plusieurs groupes dans le cas d'une perturbation plus ou moins généralisée.

c) Une horloge à coïncidences avec les appareils accessoires constituant la station de réception du signal d'heure de l'observatoire.

d) Un thermomètre à maximum et minimum.

e) Une source de courant f , qui était primitivement une pile d'éléments charbon-zinc à grande surface, chargés au sel ammoniac, et qui consiste actuellement en une série de petits accumulateurs que charge, sur place, par l'intermédiaire de la soupape électromagnétique de nos fig. 44 et 44 bis, le courant alternatif urbain.

Une grande armoire vitrée (fig. 288) protège les instruments de

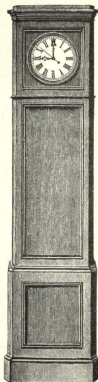
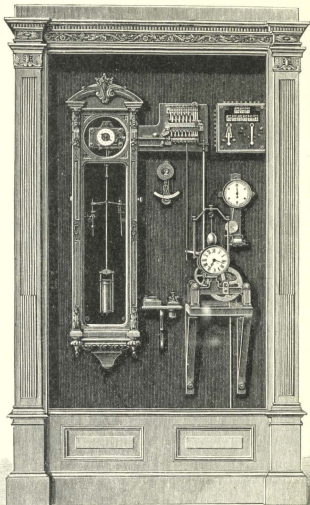


Fig. 287



TH. MOUTON, DÉPÔT.

Fig. 288

la centrale horaire contre la poussière. Les accumulateurs sont placés dans une armoire spéciale.

L'horloge-mère de réserve mentionnée sous lettre *b* ci-dessus est ordinairement installée dans l'armoire vitrée ou à côté d'elle sur la même paroi. A Neuchâtel-Ville, où le voisinage immédiat de l'usine l'a rendue superflue, elle a été supprimée ; lorsque le nettoyage de l'horloge-mère principale doit avoir lieu (tous les cinq ans environ),

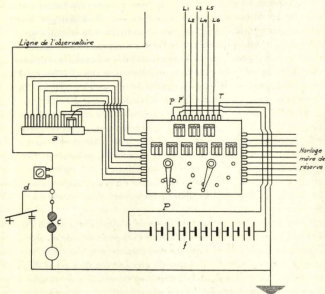


Fig. 289

on intercale provisoirement les compteurs sur un régulateur installé pour la circonstance. La figure 163 (p. 235) donne l'aspect extérieur d'une horloge-mère de réserve à palette de Hipp avec balancier battant la demi-seconde.

Les centres horaires secondaires qui dépendent de l'observatoire de Neuchâtel ayant entre autres pour but de mettre l'heure astronomique à la portée des horlogers et cela par le moyen des compteurs électrochronométriques eux-mêmes, il a fallu prendre des précautions

spéciales pour assurer, sur tous les points du réseau, la distribution exacte de cette heure.

Chaque jour, aussitôt après la réception du signal horaire sur l'horloge à coïncidences, l'horloge-mère est remise à l'heure au moyen de deux petits pendules auxiliaires qui sont placés à droite et à gauche de son balancier (fig. 288) et que l'on peut faire osciller momentanément avec ce dernier. L'un d'eux produit l'avance, l'autre le retard, et leur longueur est telle qu'une minute de fonctionnement provoque une seconde d'avance ou de retard. L'horloge à coïncidences permettant d'apprécier les soixantièmes de seconde, on n'aura qu'à mettre aux prises l'un ou l'autre des pendules auxiliaires pendant un nombre de secondes égal à celui des soixantièmes de seconde, dont l'horloge-mère avance ou retarde sur le signal d'heure. L'horloge-mère étant d'ailleurs un régulateur de précision, il n'y aura jamais plus d'une petite fraction de seconde à corriger.

Afin d'assurer la régularité de succession des émissions de courant lancées dans les six groupes de compteurs électrochronométriques à minutes, la détente mécanique déclanchant l'appareil à contacts se produit exactement au moment où l'aiguille des secondes de l'horloge-mère saute sur la seconde zéro de son cadran ; en outre le régulateur à ailettes réglables (ou à force centrifuge) du grand mouvement d'horlogerie (p. 372) assure un déroulement parfaitement régulier de son rouage.

Ces diverses précautions ont permis d'atteindre, dans la distribution de l'heure, une exactitude que l'on peut définir en disant que l'écart maximum de n'importe quel compteur est environ, pour un groupe donné, de trois dixièmes de seconde (en plus ou en moins du nombre de secondes dont la fermeture du contact du groupe considéré est normalement en retard sur l'aiguille des secondes de l'horloge-mère).

Complétons ces indications en disant que les fils amenant les émissions à minutes de la centrale horaire aux appareils horaires secondaires, sont actuellement en bronze à haute conductibilité, que le retour du courant se fait, depuis quelques années, non plus par la terre (conduites d'eau), mais par un fil de retour commun aux 6 groupes, que les résistances additionnelles primitives destinées à équilibrer les intensités de courant reçues par les compteurs très éloignés ou très rapprochés du centre horaire (p. 130 de l'édition française de 1892), ont pu être entièrement supprimées conformément à ce qui a été dit à 3^e de la page 278 de la présente édi-

tion, que le nombre des appareils horaires secondaires du réseau urbain est d'environ 275, que leurs cadrans à simple ou à double face varient en diamètre depuis 0^m10 à 2^m30, que l'un d'eux actionne un limnimètre enregistreur des variations du niveau du lac de Neuchâtel, un autre, un calendrier, d'autres encore, munis de contacts horaires appropriés, font tinter automatiquement à des moments quelconques prédéterminés, mais modifiables, les sonnettes trembleuses et les timbres à grande portée de son qui annoncent aux élèves et au personnel enseignant des divers établissements scolaires de la ville, les heures d'entrée et de sortie des leçons et des cours universitaires, enfin qu'une sous-station horaire, celle d'un grand hôpital situé à plusieurs kilomètres du centre horaire principal et possédant actuellement 34 cadrans secondaires (ce nombre pourrait être porté à plus de cent s'il le fallait), a, comme horloge-mère secondaire, un régulateur à demi-seconde à palette de Hipp qui est maintenu à l'heure, automatiquement, par l'horloge-mère principale de l'Hôtel de ville.

Il y a lieu de noter encore que la capacité de cette horloge-mère principale qui, si les résistances d'enroulement des électro-aimants secondaires restaient toutes ce qu'elles étaient lors de l'installation du réseau de début, savoir 150 ohms par cadran, serait d'environ 50×6 groupes = 300 cadrans, pourra être accrue en portant à 1000 ohms cette résistance (ce qui peut se faire peu à peu, à l'occasion des nettoyages périodiques des mécanismes), et en augmentant au fur et à mesure des besoins ultérieurs, le nombre des compteurs de chaque groupe. Ce nombre pourra ainsi atteindre successivement 60, 65, 70, 80 et plus sans que l'on ait à changer quoi que ce soit à l'appareil à contacts de l'horloge-mère à déclenchement de l'Hôtel de ville (comparer avec p. 351 et suivantes).

Quelques-uns des appareils pour centre horaire secondaire, tels que nous venons de les décrire à propos de celui de Neuchâtel-Ville, ont été sensiblement modifiés et perfectionnés par les successeurs de Hipp, en sorte qu'actuellement un tel centre comprend, sous sa forme la plus moderne, les instruments suivants (planche II) :

1^o Une horloge-mère principale à déclenchement de Hipp pourvue :

a) d'un appareil à contacts A (simple, double, etc.) exécuté selon le schéma de la figure 268 ;

b) d'un mécanisme de remontage automatique du poids moteur, conforme à celui de la figure 269.

2° Une horloge-mère de réserve *B*, du type électrique à palette de Hipp, et munie d'autant de contacts-interrupteurs de groupes qu'il y en a dans l'horloge-mère principale *A* (fig. 264).

3° Une source de courant générale comprenant deux batteries d'accumulateurs fixes, dont l'une est en charge pendant que l'autre est en décharge.

4° Un grand tableau *C* en marbre (ou en toute autre matière isolante), sur lequel sont disposés :

c) Autant de petits cadrans secondaires témoins (ou de contrôle) $h_1, h_2, \text{etc.}, h_{20}$ (schéma Pl. II), qu'il y a de groupes $H_1, H_2, H_3, \dots, H_n$ d'horloges secondaires ; chacun de ces cadrans-témoins est intercalé en dérivation à l'origine de chaque ligne principale de groupe, au-dessous des bobines non-inductives $a_1, a_2, \text{etc.}, a_{20}$ évitant les effets des extra-courants ;

d) Autant de commutateurs bipolaires $c_1, c_2, \text{etc.}, c_{20}$ qu'il y a de groupes ; ces commutateurs se manœuvrent (circulairement) à la main et chacun d'eux peut occuper à volonté l'une des trois positions suivantes :

α) Celle dans laquelle les deux fils principaux du groupe correspondant sont reliés directement avec le commutateur manuel de remise à l'heure *d*, lequel, pourvu d'un renverseur de courant à main, permet de lancer dans toutes les horloges secondaires du ou des groupes dont les commutateurs bipolaires *c* ont été mis dans la position α , des émissions alternées rapides, qui en cas de retard général, remettent ces horloges (y compris les témoins) à l'heure exacte en quelques secondes.

β) Celle où ces mêmes fils de groupes sont reliés avec le contact-interrupteur automatique correspondant de l'horloge-mère principale *A*.

γ) Celle enfin où ces mêmes fils de groupes sont reliés avec le contact-interrupteur automatique correspondant de l'horloge-mère de réserve *B*.

e) Un voltmètre *f* avec un bouton interrogateur *f'*, normalement ouvert, au moyen duquel on peut à tout instant contrôler le voltage de chacune des deux batteries I et II constituant la source de courant générale du centre horaire.

f) Le commutateur *d* de remise à l'heure des horloges secondaires dont il a déjà été parlé sous α ci-dessus.

- g) Le commutateur *e* pour la mise en charge alternative des deux batteries I et II.
- h) Un ampère mètre *g* à contact-interrupteur *g'* normalement fermé, qui mesure l'intensité du courant de charge des batteries.
- i) Enfin les bornes de connexion nécessaires.

La planche III représente la vue de devant d'un centre horaire moderne, type Favarger & C^{ie}, équipé pour actionner directement 20 groupes d'horloges secondaires, tandis que la planche II donne le schéma général des fils reliant entre eux et avec les groupes d'horloges secondaires, les divers appareils de la centrale. Les indications qui se trouvent sur ces figures suffisent à faire reconnaître et comprendre les détails d'installation et de fonctionnement déjà énumérés ci-dessus. Les batteries d'accumulateurs (non représentées dans la pl. III) et les appareils fournissant le courant de charge, sont placés dans un local approprié indépendant de celui où sont installés les instruments de la centrale horaire proprement dite.

Ces appareils de charge eux-mêmes diffèrent selon que l'on a à disposition du courant continu ou du courant alternatif. Dans le cas du courant continu, les deux fils du schéma (pl. II) qui portent l'indication « courant de charge » sont branchés directement en dérivation sur le réseau urbain de lumière, en prenant la précaution d'en ramener le voltage à la hauteur convenable au moyen d'une lampe à incandescence ou de toute autre résistance ohmique appropriée. Lorsque, au contraire, le courant urbain disponible est alternatif on le transforme en courant continu soit au moyen d'un *convertisseur rotatif* (petit moteur pour courant alternatif mono ou triphasé accouplé mécaniquement avec une petite machine d'induction livrant du courant continu), soit au moyen d'une soupape Nodon, d'un vibreur ou d'un convertisseur à lampe de mercure. (Comparer avec pages 73 et suiv. de la Partie théorique.)

B. Système d'unification de l'heure civile selon le type de la Société Normal-Zeit, dans lequel les horloges secondaires sont elles-mêmes directement remises à l'heure.

Le principe fondamental de ce système, qui a été appliqué en grand dans diverses villes importantes d'Allemagne, de Belgique, des pays scandinaves, etc., est celui de la remise à l'heure et du remontage individuel et périodique des horloges secondaires.

L'horloge-mère principale de la centrale urbaine, qui est synchro-

nisée par une pendule de précision remise elle-même à l'heure chaque jour et placée le plus souvent dans l'observatoire astronomique le plus voisin, actionne une roue de contact *a* (fig. 290) qui, en tournant, établit et interrompt la communication de la source de courant *b* (dont un pôle est à la terre) avec le fil de ligne *c* des horloges secondaires *d*, à travers l'électro-aimant de contrôle *e* d'un appareil enregistreur à bande de papier sans fin *f*. Chaque fermeture de courant produite par *a* dure deux minutes et chaque interruption, $1\frac{3}{4}$ minute. La somme de ces deux durées, soit $3\frac{3}{4}$ minutes, est le temps

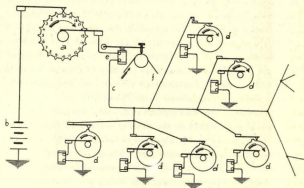


Fig. 290

consacré à chacune des horloges secondaires branchées sur la ligne *c*, pour le remontage de son mouvement d'horlogerie et pour sa remise à l'heure. Comme cette durée de $3\frac{3}{4}$ minutes est contenue 16 fois dans une heure et 64 fois dans 4 heures, on pourra atteler, sur le fil de ligne *c*, 64 horloges secondaires *d* qui seront ainsi remontées et remises à l'heure isolément et chacune à son rang, une fois en 4 heures et six fois en 24 heures.

Ce sont les horloges secondaires qui, au moyen d'un contact-interrupteur spécial adapté à leur mécanisme, s'intercalent elles-mêmes, chacune à son tour et successivement, sur le fil de ligne *c*. Si, par exemple, l'horloge secondaire N° 1 s'intercale à midi juste, l'horloge N° 2 s'intercalera à 12 h. $3\frac{3}{4}$ minutes, l'horloge N° 3, à 12 h. $7\frac{1}{2}$ minutes, et ainsi de suite.

Pendant que chaque horloge secondaire s'est ainsi insérée entre le fil *c* et la terre, elle reçoit le courant envoyé par l'horloge-mère

centrale et le dirige d'abord sur un petit moteur électrique qui remonte rapidement et à fond le ressort-moteur de l'horloge ; lorsque ce remontage est terminé, l'horloge secondaire interrompt automatiquement la communication du fil de ligne *c* avec le moteur électrique et l'établit avec l'électro-aimant de remise à l'heure ; toutefois, l'armature de ce dernier ne peut produire son effet que lorsque le permet la chute d'un levier spécial qui a lieu au moment précis où les aiguilles de l'horloge secondaire arrivent à l'heure qui sera celle de l'interruption du courant par l'horloge-mère. Comme le pendule de l'horloge secondaire est réglé de manière à avancer légèrement, la chute dudit levier se produira quelques secondes avant que l'horloge-mère arrive elle-même à l'heure indiquée et interrompe le courant. Au moment de la chute du levier, l'électro-aimant de remise à l'heure a pu agir ; il a alors arrêté l'ancre d'échappement de l'horloge secondaire, tout en laissant au pendule la liberté d'osciller momentanément *à vide*. Le mouvement et les aiguilles de cette horloge secondaire s'arrêtent ainsi jusqu'à ce que l'horloge-mère, ayant coupé le courant, l'électro-aimant de remise à l'heure lâche son armature et rende leur liberté à l'ancre et au rouage ; à ce moment, l'horloge secondaire indique sur son cadran le temps exact de l'horloge-mère ; *elle a été effectivement remise à l'heure*. Quatre heures plus tard, la même série d'opérations automatiques : intercalation de l'horloge secondaire, remontage de son ressort-moteur par le courant central, commutation de ce courant, intercalation de l'électro-aimant de remise à l'heure, chute du levier, arrêt de l'horloge secondaire et sa remise en marche — se répète — et ainsi de suite, toutes les quatre heures, pour la même horloge secondaire.

Au moment où une horloge secondaire quelconque s'intercale dans le circuit de ligne, l'électro-aimant de contrôle *e* de l'enregistreur de la centrale, à travers lequel passe le fil de ligne *c*, devient actif, attire son armature et marque un point sur la bande de papier *f* qui se meut avec une vitesse parfaitement uniforme. Selon que l'une ou l'autre des horloges secondaires se sera placée sur le circuit plus tôt ou plus tard que le moment qui convient au rang qu'elle occupe, son point de contrôle se sera marqué trop tôt ou trop tard sur la bande de papier *f* et alors, au moyen d'une échelle de verre gravée de traits fins, on pourra déterminer exactement la grandeur de l'écart de marche subi à ce moment par l'horloge secondaire. De même l'absence totale du point de contrôle indiquera que quelque chose d'anormal (arrêt de l'horloge secondaire, par exemple) existe.

L'enregistreur-contrôleur permet ainsi de suivre, de la centrale, la marche de toutes les horloges secondaires de la ligne *c* et trahit immédiatement tout défaut de l'installation horaire, le plus souvent avant que les abonnés à l'heure aient eux-mêmes pu s'en apercevoir.

Les horloges secondaires pouvant marcher trois jours pleins sans être remontées, un défaut empêchant soit le remontage automatique normal de l'une d'elles, soit sa remise à l'heure, n'aura pas pour effet d'arrêter l'horloge ; celle-ci pourra encore marcher trois jours, il est vrai avec une exactitude moindre, mais ce temps sera largement suffisant pour que l'employé que cela concerne ait pu éliminer le défaut (que d'ailleurs l'enregistreur-contrôleur persistera à dénoncer toutes les 4 heures jusqu'à élimination).

Nous avons vu tout à l'heure que le nombre des horloges secondaires pouvant être desservies isolément par un seul et même fil de ligne *c*, était de 64. Ce nombre peut cependant être considérablement plus grand, si l'on admet que plusieurs horloges secondaires puissent être actionnées simultanément au même instant. Or, l'expérience a montré que le courant de la centrale horaire pouvait être augmenté, en puissance, de manière à pouvoir remonter d'un seul coup jusqu'à dix horloges, chacune d'elles étant pourvue de son contact, de son moteur électrique et de son électro-aimant de remise à l'heure ; ces organes sont alors intercalés en tension les uns à la suite des autres et ce n'est que lorsque les dix contacts se sont fermés que le courant central peut entrer dans le groupe et effectuer le remontage simultané des dix horloges, leur remise à l'heure et leur contrôle. Dès lors, notre chiffre de 64 pourra être multiplié par 10 et un seul et même fil de ligne *c* pourra ainsi desservir 640 horloges secondaires.

D'autre part, une seule et même horloge-mère centrale peut desservir jusqu'à 20 fils de ligne tels que *c*, portant chacun 64 groupes de 10 horloges et un électro-aimant de contrôle. Le nombre total maximum d'horloges secondaires que peut actionner l'horloge-mère centrale est ainsi de $64 \times 10 \times 20 = 12\,800$.

Il est cependant rare que l'on charge une seule horloge-mère au maximum de cette capacité de 12 800. On a plutôt intérêt à répartir la charge totale entre 2, 3, etc., horloges-mères placées chacune au centre de l'un des quartiers à desservir, de manière à actionner deux à trois mille horloges. On fait ainsi une économie de fils.

Nous allons maintenant passer en revue les différents organes d'un système de distribution du type Normal-Zeit.

a) **Récepteurs.** — Les figures 291, 292, 293 et 294 donnent la disposition d'une horloge secondaire de ce type.

Son mécanisme consiste en un mouvement d'horlogerie renfermé entre deux platines AA' et muni d'un échappement à ancre et d'un balancier pendulaire. On voit en 10 (fig. 291 et 292) cette ancre ; la roue d'échappement et le pendule ne sont pas représentés. Le harillet renfermant le ressort-moteur est en x (fig. 293). Il a les dimensions voulues pour pouvoir au besoin actionner l'horloge pendant trois fois 24 heures avant d'être détendu ; mais, ainsi que nous l'avons dit plus haut, il est normalement remonté toutes les quatre heures par le courant de la centrale horaire. On voit en t l'axe flexible que fait tourner le moteur électrique remonteur (celui-ci n'est pas dessiné) ; cet axe t transmet son mouvement de rotation à deux roues coniques 13 et 14 puis à un pignon 15 qui engrène avec une roue dentée 16 calée sur l'arbre du barillet. Des précautions spéciales sont prises pour que le ressort ne soit normalement bandé par le moteur électrique, que de la quantité qui correspond à 4 heures de marche.

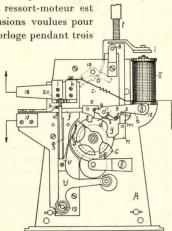


Fig. 291

Les deux fils amenant le courant de la centrale sont attachés aux bornes 17 et 18 (fig. 291). A la première, 17, est fixé un ressort f portant une petite vis de contact à bout platiné. L'extrémité droite de f est munie d'une pièce saillante e en os dont le bec peut frotter sur la périphérie d'un disque d qui est calé sur l'axe de l'aiguille des minutes et qui a deux entailles y et z .

En temps ordinaire, le talon de la pièce e s'appuie sur une goupille 4 que porte à sa partie gauche une bascule b pivotée en 11. Cette bascule est maintenue dans la position dessinée sur la figure par un petit contrepoids 12 qui est plus lourd que e et f . Il résulte

de cet arrangement que la vis *h* ne peut pas toucher le point platiné correspondant de la saillie latérale du ressort *g* (fig. 291 et 292), et que par suite le courant de la centrale est arrêté en *h*.

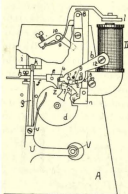


Fig. 292

Le ressort *g* est fixé sur un levier *U* à 2 branches dont l'axe est en 19 et que nous appellerons « switch » ; *g* est prolongé en haut par un doigt platiné 20 qui, suivant la position à gauche ou à droite du switch *U*, peut faire contact avec la saillie du plot platiné *i* ou avec celle du plot platiné *k*. On voit sur la figure 294 les profils des plots *i* et *k*.

En temps ordinaire, *g* est en contact avec *i*.

La roue des heures *c* de l'horloge porte 3 goupilles 5, 6 et 7 (fig. 291) qui, en passant, peuvent, d'une part pousser le ressort *u* du switch pour placer ce der-

nier dans sa position gauche, d'autre part presser sur la queue d'un petit ressort 9 en fil d'acier que porte la bascule *b* et qui, fixé en 9, peut jouer entre les goupilles 1 et 2 de cette bascule.

Lorsqu'une des trois goupilles, 7 par exemple (fig. 292), est en prise avec le ressort 9, la bascule est entraînée et forcée de tourner d'un certain angle autour de son axe *II*. Elle prend alors la position de la figure 292 ; la saillie *e* du ressort *f* n'étant plus soutenue par la goupille 4 de la bascule, arrive d'abord en contact avec la périphérie du disque *d*, puis, au moment où l'entaille *z* se présente, tombe au fond de celle-ci. A ce moment précis, qui est réglé pour chaque horloge secondaire selon son numéro d'intercalation sur la ligne (voir plus haut), la vis de contact *h* touche le ressort *g* et comme celui-ci est lui-même en contact avec le

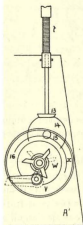


Fig. 293

plot *i*, le courant de la centrale pénètre par *hgi* dans le moteur électrique chargé de remonter le ressort du barillet. Ce remontage s'effectue et en même temps l'étoile π à 3 bras (fig. 293), qui est reliée élas-

tiquement avec l'arbre du barillet, tourne d'un certain angle et, à la fin du remontage, vient pousser brusquement par l'un de ses bras (chaque bras travaille à son tour toutes les 4 heures) la roulette isolée *V* que porte la branche horizontale du switch *U*, branche qui pénètre à l'intérieur de la cage du mouvement d'horlogerie par une ouverture convenable de la platine *A*.

Le switch est ainsi forcé de prendre sa seconde position, celle pour laquelle l'extrémité supérieure de *g* vient toucher le plot *k*. A ce moment le courant de la centrale cesse de passer dans le moteur électrique et le remontage s'arrête ; par contre, ce courant entre par le fil *21* dans l'électro-aimant de remise à l'heure *II* qui attire alors son armature *l* pivotée en 8. Celle-ci cependant ne peut pas encore obéir à cette attraction, empêchée qu'elle est par un bras *m* qu'elle porte et dont le bec inférieur *n* est arrêté par la périphérie du disque *d* en avant de l'entaille *y*. Ce n'est que lorsque cette dernière a laissé tomber ce bec (fig. 292) que l'armature *l* peut faire son mouvement et pousser par l'intermédiaire du ressort *o* une goupille fixée à la branche gauche de l'ancre d'échappement *10* ; en même temps la goupille 3 du levier *m* presse sur la partie courbe de la bascule *b* et la maintient dans la position inclinée de la figure 292, alors même que la goupille 7 de la roue des heures a laissé échapper le ressort *9*.



Fig. 294

L'ancre *10*, dont la fourchette d'échappement (non dessinée) s'appuie d'un seul côté sur la tige du pendule, grâce à un contrepoids, est ainsi immobilisée, de même que la roue d'échappement (non dessinée), tandis que le pendule continue à osciller à vide.

Au bout de quelques secondes, qui correspondent à la quantité dont le pendule de l'horloge secondaire avance en 4 heures sur l'horloge-mère centrale, celle-ci interrompt son courant, l'armature *l* revient à la position non-attirée, libère l'ancre *10* (ce qui remet en marche le mouvement et les aiguilles de l'horloge secondaire) et sort le bec *n* de l'entaille *y* ; la bascule *b*, sous l'influence de son contrepoids *12*, reprend sa position primitive en relevant le ressort *f* dont la vis de contact *h* s'éloigne de *g* (courant de la centrale coupé) ; enfin, aussitôt après, la goupille 5 de la roue des heures pousse le switch *U* à gauche, et tout est prêt pour la remise à l'heure suivante qui aura lieu quatre heures plus tard.

Le système d'horloge secondaire Normal-Zeit que nous venons de décrire s'applique tel quel à des horloges intérieures dont les

cadrans varient de 25 à 60 centimètres de diamètre. Pour des cadrans ayant de plus grands diamètres ou exposés aux intempéries, la Société Normal-Zeit emploie des mouvements d'horloges de clocher (avec moteurs à poids) auxquels le contact et l'électro-aimant de remise à l'heure sont seuls adaptés, le remontage s'effectuant soit à la main, soit automatiquement au moyen d'un moteur électrique approprié.

A Berlin, où a été installé le premier des réseaux de distribution d'heure du type Normal-Zeit, une grande partie des horloges secondaires sont remises à l'heure, non pas exclusivement par l'électricité, mais bien avec l'aide d'une pompe à air qu'actionne, au moment voulu, un robinet placé sur la conduite d'eau de la maison (Wasserstrahl-Luftpumpe). Ce robinet est ordinairement tenu fermé par un électro-aimant spécial dont l'enroulement est relié avec le contact que l'horloge secondaire ferme elle-même toutes les 4 heures. Aussitôt que ce contact se ferme, le robinet d'eau s'ouvre électromagnétiquement, et la pompe à air, entrant en activité, enlève l'air d'une capsule avec laquelle elle est reliée par un tuyau de plomb et qui est placée dans le voisinage immédiat du mécanisme de l'horloge secondaire. Cette capsule est fermée d'un côté par une membrane hermétique en cuir souple qui, pressée extérieurement par l'air atmosphérique (auquel ne peut plus faire équilibre l'air raréfié à l'intérieur de la capsule), soulève lentement un levier approprié. Mais aussitôt que la centrale horaire coupe son courant (voir ci-dessus), le robinet électro-magnétique de la conduite d'eau se ferme, l'air rentre dans la capsule et la membrane, grâce à un ressort spécial, est ramenée à sa position primitive; le levier qu'elle commande retombe et remet à l'heure instantanément, par l'intermédiaire d'un bloc à entaille (analogue à celui de la fig. 281), les aiguilles de l'horloge secondaire.

b) **Horloge-mère.** — L'horloge-mère d'une centrale horaire du type Normal-Zeit peut, avons-nous dit, actionner jusqu'à 20 lignes comprenant chacune 64 groupes de 10 horloges secondaires. Son balancier pendulaire est synchronisé par une pendule de précision qui lui envoie, toutes les deux secondes, des émissions agissant sur un solénoïde qui oscille avec le balancier et dont les spires réagissent, aux moments les plus favorables, sur un aimant fixe qu'elles enveloppent. La pendule de précision peut synchroniser plusieurs horloges-mères réparties dans les divers quartiers d'une grande ville.

Chaque horloge-mère consiste en un robuste mouvement d'horlogerie actionnant l'appareil à contacts des lignes et la bande de papier de l'enregistreur. En face de cette bande sont disposés les 20 électro-aimants contrôleurs. Chacun de ceux-ci marque un point sur la bande lorsqu'une des horloges secondaires (ou un groupe) s'intercale à son rang sur la ligne correspondante.

Les divers instruments d'une centrale horaire sont :

1. L'horloge-mère principale à 20 lignes avec son enregistreur.
2. Une horloge-mère de réserve prenant automatiquement le service dans le cas où la principale serait momentanément endommagée.

3. Un tableau de connexions avec galvanomètres, interrupteurs, commutateurs, etc.

4. Une batterie d'accumulateurs avec son tableau et ses appareils de charge. La dépense de courant est d'environ 550 kilowatt-heures par an pour 1000 groupes d'horloges secondaires.

c) **Réseau des fils.** — Il faut le faire, de préférence, souterrain. En Allemagne, la Direction des Postes et Télégraphes de l'Empire met à la disposition de la Société de distribution d'heure les fils nécessaires pris sur son réseau téléphonique, moyennant une redevance annuelle qui était, avant la guerre, de 45 marks par kilomètre. Le mode d'intercalation des groupes d'horloges secondaires a été donné sur la figure 290. C'est celui en dérivation. Par contre, dans chaque groupe, les horloges sont en série. Le retour du courant se fait par la terre.

C. Système d'unification de l'heure civile selon le type de la maison Favarger & C^e, dans lequel ce sont les horloges-mères secondaires qui sont automatiquement remises à l'heure, les horloges secondaires elles-mêmes étant, pour la plupart, des compteurs électrochronométriques à armatures polarisées.

Le tableau synoptique de la planche IV représente schématiquement, par figures et légendes, les différentes parties de ce système. En lisant, avec l'aide d'un verre grossissant, les textes de ces légendes, on constate que, du centre à la circonférence du réseau horaire unifié, existent les cinq postes (ou zones de postes) suivants :

- I. A l'observatoire le plus voisin de la station centrale urbaine,

une pendule de haute précision, toujours maintenue à l'heure exacte, synchronise les balanciers de deux horloges-mères à déclenchement, l'une principale, l'autre de réserve, installées dans cette station. Ce système synchronisateur, dont la disposition est connue des lecteurs, n'est représenté, sur notre tableau, que par les deux fils marqués : Observatoire.

II. La station centrale urbaine proprement dite, avec ses deux horloges-mères A_1 et A_2 , un appareil électromagnétique B à déclenchement intercalant automatiquement l'horloge-mère de réserve A_2 à la place de l'horloge-mère principale A_1 , quand cette dernière risque de s'arrêter, une horloge spéciale C contrôlant, à distance, par enregistrement local, la marche correcte de toutes les horloges-mères secondaires; enfin, deux sources de courant E et D .

III. Les différents postes d'horloges-mères secondaires de quartiers; celles-ci sont maintenues à l'heure automatiquement par l'horloge-mère principale (ou éventuellement de réserve) de la centrale urbaine selon le système de remise à l'heure.

IV. Les appareils horaires (cadrans extérieurs ou intérieurs des compteurs électrochronométriques à armatures polarisées, horloges de clochers ou de frontons avec ou sans sonneries d'heures, compteurs à contacts actionnant des signaux horaires périodiques fixes ou variables pour fabriques, bureaux, écoles, etc.) dépendant directement des horloges-mères secondaires.

V. Enfin, les appareils électromagnétiques quelconques (acoustiques ou optiques) tels que réveille-matin, distributeurs de l'heure, sonnée, aides-mémoire, enregistreurs industriels ou scientifiques etc., lesquels, dépendant des appareils horaires mentionnés sous IV ci-dessus, nécessitent des sources de courant spéciales (piles primaires ou secondaires locales, dérivations prises sur les fils urbains de lumière ou de force, etc.).

Voici quelles sont les dispositions et les fonctions des différentes parties du système.

I et II. **Station centrale urbaine.** — Les deux horloges-mères sont en marche continue et leurs balanciers, qui battent la seconde, sont synchronisés au moyen d'électro-aimants spéciaux placés à la partie inférieure de chaque instrument. Ces deux horloges étant semblables entre elles, sauf pour un petit détail que nous mentionnons plus loin, il suffira de décrire l'une d'elles.

Son moteur est un double-poids qui est remonté automatiquement

par un petit moteur électrique, non représenté sur la planche et branché sur le réseau urbain d'éclairage ou de force. Ce double-poids actionne deux mouvements d'horlogerie : l'un, celui du haut, est pourvu d'un échappement mécanique avec ancre Graham et d'un cadran avec aiguilles d'heures, de minutes et de secondes ; l'autre, celui du bas, produit les contacts agissant sur les horloges-mères secondaires pour les remettre à l'heure et effectuer le contrôle de leur marche.

A la fin de chaque minute, au moment précis où l'aiguille des secondes arrive au zéro de son cadran, le mouvement du bas est déclenché mécaniquement par celui du haut, et alors un axe à deux ressorts de contacts fait, en dix secondes environ, un demi-tour, ce qui a pour effet de relier successivement chacun des dix contacts fixes de groupes des horloges-mères secondaires avec le pôle positif de la source de courant de remise à l'heure.

A chacun de ces 10 contacts fixes, est attaché l'un des deux fils du groupe correspondant, lequel fil passe, avant de sortir de la station centrale, par l'un des 10 électro-aimants de contrôle de l'enregistreur C. Ensuite, chaque fil de groupe, accompagné de son fil de retour (commun aux 10 groupes), fait le tour des postes d'horloges-mères secondaires qu'il commande et dont le nombre maximum est 60, nombre de minutes qu'il y a dans une heure, ce qui correspond à une capacité totale de $60 \times 10 = 600$ horloges-mères secondaires par horloge-mère centrale. Le fil de retour commun est attaché au pôle négatif de la source de courant.

Il résulte de ce qui précède, qu'à chaque minute il circule dans chaque ligne de groupe une émission de courant d'une durée d'environ une seconde, qui est fournie par la station centrale et qui peut être employée à contrôler, et éventuellement à remettre à l'heure, une des horloges-mères secondaires dépendant de ce groupe, ainsi que nous l'expliquerons plus loin.

La mise en fonction automatique de l'horloge-mère centrale de secours a lieu de la façon suivante :

Un arrêt du balancier de l'horloge-mère principale ne peut se produire qu'après que son amplitude a passé par des valeurs décroissantes, depuis celle où cette amplitude est normale, jusqu'à celle où elle est égale à zéro. Or, aussitôt après que l'amplitude normale a cessé d'exister, le contact d'un échappement électrique à palette de Hipp, placé à mi-hauteur du balancier de l'horloge-mère principale, entre en action de la manière connue, et ferme le courant

de la petite pile locale *E* sur l'électro-aimant de l'appareil de déclenchement dont il a été parlé sous II de la page 428 ; cet électro-aimant attire son armature qui laisse tomber un lourd levier commutateur et met ainsi l'horloge-mère de secours en communication avec le pôle positif de la source du courant de remise à l'heure, en lieu et place de l'horloge-mère principale et à l'exclusion de celle-ci. A partir de cet instant, c'est l'horloge-mère de secours qui opère le contrôle et la remise à l'heure des horloges-mères secondaires.

Une fois écarté le défaut qui a provoqué la défaillance momentanée de l'horloge-mère principale, on remet celle-ci en fonction à l'exclusion de celle de secours, en remplaçant à la main, dans sa position normale, le levier commutateur de l'appareil de déclenchement *B*, qui est dès lors prêt pour une seconde opération analogue, éventuellement nécessaire, et ainsi de suite.

L'horloge de contrôle, qui est du type électrique à palette de Hipp et dont le pendule, battant la demi-seconde, peut être synchronisé par le courant de l'observatoire, fait progresser régulièrement, dans le sens de sa longueur, une bande de papier sans fin. Le contrôle de la bande se fait très simplement en s'assurant si, à chaque minute, les 10 points des 10 horloges-mères secondaires à contrôler pendant cette minute (une seule par groupe), se sont bien marqués. L'absence de l'un de ces points indiquerait que quelque chose d'anormal se passe dans le poste d'horloge-mère correspondant ; le numéro de ce poste est indiqué, instantanément, d'une part par le rang qu'occupe le point absent au milieu des 9 autres et, d'autre part, par le numéro d'ordre de la minute où il manque.

Le voltage de la source du courant de remise à l'heure dépend surtout de la résistance des deux fils de groupe qui desservent le poste d'horloge-mère secondaire le plus éloigné de la station centrale. Comme cette source n'a jamais à actionner simultanément que deux électro-aimants au plus, à savoir celui de l'enregistreur de contrôle et celui d'un seul poste d'horloge-mère secondaire, l'intensité de chacune de ses émissions sera relativement faible en sorte que les contacts-interrupteurs de groupes pourront fonctionner très longtemps sans se salir et sans se détériorer.

III. Postes d'horloges-mères secondaires. — Ils sont tous semblables. Chacun d'eux comprend :

a) Une horloge-mère secondaire électrique à palette de Hipp à grande capacité ;

b) Deux sources de courant alimentant l'une, *g*, les compteurs

électrochronométriques secondaires dépendant du poste et l'autre, *c*, l'électro-aimant moteur de l'horloge-mère secondaire. (*Nota.* Ces deux sources peuvent au besoin être fondues en une seule);

c) Un tableau sur marbre (non représenté sur la pl. IV) semblable à celui qui a déjà été décrit sous chiffre 4 (p. 418) de la description d'une centrale horaire moderne type Favarger & C^{ie}; ce tableau reste en effet le même ici que dans le cas de la centrale horaire avec horloge-mère à déclanchement de Hipp.

L'horloge-mère secondaire *a*) ci-dessus est elle-même pourvue :

1. de l'échappement électrique à palette de Hipp *a* (pl. IV) et de l'électro-aimant *b* entretenant les oscillations du balancier *H* de l'horloge-mère secondaire avec le concours de la source de courant locale *c*.

2. du contact de contrôle *d*, de l'électro-aimant de remise à l'heure *e* avec son armature et son levier à deux branches, de deux disques à entailles.

3. des contacts-inverseurs *f* capables d'actionner directement (sans l'intermédiaire d'aucun relais) jusqu'à 500 appareils horaires secondaires à minutes.

Voici comment fonctionnent le contrôle et la remise à l'heure :

A. **Contrôle.** — Le contact de contrôle *d* de chaque horloge-mère secondaire est fermé automatiquement par cette dernière, une fois par heure, à une minute déterminée d'avance et qui est différente pour tous les postes secondaires d'un même groupe.

Dans ce but, la roue de l'horloge-mère secondaire faisant un tour en une heure, porte une goupille qui vient, une fois par heure, lever le talon d'un ressort de contact et fermer ainsi ce contact à la minute précise qui convient au poste en cause.

Lorsque, quelques secondes plus tard, l'horloge-mère centrale ferme à son tour le contact du fil de groupe correspondant, le courant ainsi fourni par la station centrale trouve un circuit fermé qui, passant à travers celui des dix électro-aimants de l'enregistreur qui correspond à ce groupe, provoque l'impression, sur la bande de papier, du point de contrôle. Ce point, si tout est normal, doit se trouver sur cette bande à la minute précise qui convient, par prédétermination, au poste secondaire en cause.

A la minute suivante, ce sera un autre poste secondaire voisin qui sera contrôlé, et ainsi de suite pour tous les autres postes du même groupe.

Il résulte de cet arrangement que les points de contrôle des 10

groupes d'horloges-mères secondaires que peut contrôler l'horloge centrale en une seule et même minute, se trouveront, tous les dix, sur une même ligne perpendiculaire (ou peu s'en faut) aux bords de la bande de papier de l'enregistreur.

Remarque. — Si parmi les cadrans secondaires dépendant directement de l'horloge-mère secondaire, il s'en trouve un, particulièrement important, dont le contrôle soit aussi désiré, on pourra munir son mouvement d'un contact automatique de contrôle qui, mis en série avec celui de l'horloge-mère secondaire et fermé à la même minute, ne permettra l'impression du signal de contrôle que si les deux contacts sont vraiment fermés simultanément, autrement dit, que si les deux horloges marchent d'accord. On pourra même étendre à 2, 3, etc., horloges importantes cette participation au contrôle.

B. Remise à l'heure. — Elle s'effectue comme suit :

Toutes les douze heures, le levier à deux branches portant l'armature de l'électro-aimant de remise à l'heure, tombe dans deux encoches, dont l'une se trouve sur un disque solidaire de la roue qui fait un tour en douze heures, et l'autre sur un autre disque solidaire de la roue qui fait un tour en une heure. Au moment de cette chute, qui ne peut avoir lieu que lorsque les deux encoches se placent simultanément devant les talons correspondants du levier à deux branches, l'une de celles-ci vient placer son extrémité devant une goupille de la roue d'échappement de l'horloge-mère secondaire (laquelle fait un tour par minute) et l'arrête jusqu'à ce que le courant de contrôle (et cette fois de remise à l'heure), lancé de la station centrale, vienne libérer cette roue par l'attraction de l'armature de l'électro-aimant. La chute du levier d'armature dans les encoches des deux roues d'heures et de 12 heures doit *précéder* de quelques secondes l'arrivée de l'émission du courant de la centrale, et pour cela le balancier de l'horloge-mère secondaire doit être réglé de manière à avancer de 3 à 4 secondes par 24 heures, sur celui de l'horloge-mère centrale (ou, ce qui revient au même, sur le temps de la pendule de l'observatoire). La libération de la roue d'échappement de l'horloge-mère secondaire ayant lieu au moment précis où commence l'émission du courant central, l'horloge-mère secondaire indique aussi à partir de ce moment l'heure exacte : *elle a été remise à l'heure.*

Douze heures plus tard, au cours desquelles l'horloge-mère secondaire a de nouveau avancé de quelques secondes, nouvel arrêt

automatique de cette horloge, nouvelle remise à l'heure, et ainsi de suite, de douze en douze heures.

Le contrôle de ces remises à l'heure successives se marque aussi par des points sur la bande de l'enregistreur de la centrale. Bien entendu, les remises à l'heure des différentes horloges-mères secondaires d'un même groupe ont lieu individuellement à des minutes différentes, grâce toujours au contact automatique de chacune d'elles qui fonctionne, pour la remise à l'heure de 12 heures, exactement de la même manière que pour les contrôles de chaque heure.

Toutefois, il est bon de remarquer ici que les courants de contrôle ayant lieu toutes les heures, passent tous aussi dans l'électro-aimant de remise à l'heure, mais que onze d'entre eux n'ont aucun effet sur le levier d'armature, ni par conséquent sur la roue d'échappement, puisque ces onze émissions trouvent ce levier hors des encoches. Seule la douzième émission atteindra l'horloge-mère secondaire peu après le moment où ce levier est tombé et a momentanément arrêté la roue d'échappement. Nous soulignons encore le fait que pendant l'arrêt de cette roue, le balancier de l'horloge-mère secondaire continue à osciller grâce à l'échappement électrique à palette, ce qui assure la reprise immédiate de la marche de cette horloge, dès l'arrivée de l'émission libératrice.

Enfin, il faut ajouter, pour répondre à une objection qui se présente naturellement à l'esprit, que dans le cas où l'émission libératrice de la station centrale viendrait pour une raison quelconque à manquer, un dispositif approprié assurerait localement la remise en marche automatique de l'horloge-mère secondaire, quelques secondes après que le *raté* du courant central se serait produit, et empêcherait ainsi un arrêt prolongé de cette horloge et de tous les appareils horaires qui en dépendent. L'absence du point de contrôle de la remise à l'heure ratée obligera d'ailleurs le surveillant compétent à intervenir pour écarter le plus vite possible le défaut qui l'a occasionnée.

La source de courant de chaque poste secondaire qui a à alimenter les appareils horaires correspondants, devra avoir un voltage en rapport avec la résistance de la plus longue ligne de groupe à desservir et avec la résistance choisie pour l'enroulement de tous les électro-aimants des compteurs électrochronométriques.

Lorsque les lignes de groupes ne sont pas longues, comme c'est le cas quand les 500 compteurs que peut actionner une seule et même horloge-mère secondaire sont répartis dans l'intérieur d'un seul bâti-

ment ou de quelques bâtiments voisins (grand hôtel, hôpital, etc.), une batterie de quelques petits accumulateurs transportables d'une capacité de quelques ampères-heures suffit à actionner le réseau secondaire pendant un mois, ce qui correspond à 12 charges par an. Il va de soi que si, au lieu de 500 appareils horaires, le réseau secondaire n'en a que 250 ou 125, les intervalles des temps de charge sont respectivement 2 fois, 4 fois plus longs, et que l'on n'aura à recharger les accumulateurs que 6 ou 3 fois par an. Toutefois, ainsi que nous l'avons déjà vu ailleurs, on pourra aussi organiser les postes secondaires de telle manière que la charge des accumulateurs ait lieu automatiquement sur place, au moyen du courant urbain d'éclairage, soit par l'intermédiaire de groupes transformateurs rotatifs ou de redresseurs vibreurs ou à mercure, si le courant ainsi disponible est alternatif, soit directement, s'il est continu.

IV. Réseau des appareils horaires dépendant directement d'un poste d'horloge-mère secondaire. — Les mécanismes électromagnétiques de ces appareils horaires sont normalement, dans tous les systèmes de distribution d'heure de la maison Favarger & C^{ie}, soit des réceptrices à armatures oscillantes de Hipp, soit des réceptrices à armatures rotatives dentées de Favarger ; elles exigent toutes des émissions de courant alternativement renversées (voir chap. III sous lettres $A b_1$ et $A b_2$, p. 305, 306 et 324). Nous ne reviendrons pas ici sur les considérations qui ont conduit à adopter les mécanismes récepteurs à courants alternés de préférence à ceux à émissions toujours de même sens ; on en retrouvera l'exposé détaillé à pages 281 et suivantes. Nous ne nous appesantirons pas non plus sur les conditions, parfois sévères, auxquelles doit satisfaire un système d'appareils horaires secondaires pour être applicable aussi bien à l'extérieur qu'à l'intérieur des maisons. Nous trouvons cependant utile de résumer ici comme suit les plus essentielles d'entre elles :

Insensibilité des mécanismes des réceptrices aux variations de température et d'humidité de l'air, à la poussière, aux courants atmosphériques ou à toute autre cause perturbatrice provenant du milieu ambiant.

Bon rendement électro-mécanique de ces mécanismes.

Insensibilité aussi grande que possible de l'organe électromagnétique mobile aux variations éventuelles des courants moteurs (comparer avec p. 282).

Suppression des effets nuisibles des extra-courants sur les sur-

faces de contacts des horloges-mères et sur les réceptrices elles-mêmes (comparer avec p. 282 et suiv.).

Impossibilité de la formation de rouille ou autres oxydes métalliques sur les mécanismes des compteurs lorsque ceux-ci sont des horloges de rue exposées à toutes les intempéries de l'air extérieur.

Grande indépendance électrique des appareils horaires récepteurs entre eux : il faut pouvoir enlever l'un d'eux, en ajouter d'autres, sans avoir à prendre de précautions spéciales pour assurer la continuité de la marche correcte de ceux qui doivent rester en fonction (comparer avec p. 278).

Possibilité d'intercaler sur un même fil de groupe des cadrans très grands ou très petits sans qu'il y ait réaction perturbatrice des premiers sur les seconds.

Emploi aussi restreint que possible de relais à interposer entre un contact de groupe d'horloge-mère et ses cadrans secondaires. Dans la pratique, l'emploi de tels relais est exceptionnel et ceux-ci ne doivent être appliqués que dans les cas d'ailleurs rares où il est matériellement impossible d'obtenir, de l'émission normale envoyée directement par le contact-interrupteur de groupe, le travail électromécanique que nécessite un appareil horaire extraordinaire.

Les émissions expédiées par une centrale horaire quelconque, primaire ou secondaire, du type de la maison Favarger & C^{ie}, peuvent être employées directement (sans relais) pour actionner n'importe quels appareils électromagnétiques autres que ceux faisant sauter des aiguilles sur les divisions des cadrans unifiés. C'est ainsi qu'elles peuvent mouvoir (ou synchroniser, ou contrôler) des calendriers, des enregistreurs des variations de niveaux d'eau, des enregistreurs industriels et scientifiques, etc., etc., soit, d'une manière générale, tout appareil électromécanique qui, pourvu d'une résistance d'enroulement convenable, peut accomplir sa fonction correcte en utilisant directement les émissions de la centrale.

Quant aux appareils nécessitant des courants plus forts, il faut les brancher sur des circuits locaux pourvus de sources de courant spéciales et commandés par des contacts horaires à placer dans le compteur électrochronométrique le plus voisin (voir ci-dessous).

V. Circuits locaux commandés par les contacts horaires d'un cadran secondaire voisin. — Les appareils électromagnétiques de ces circuits locaux peuvent, eux aussi, être quelconques. Leur

variété est telle que nous ne pouvons en faire ici une énumération complète. Nous nous bornerons à commenter les quelques exemples de ce genre qui figurent sur la planche IV.

Signaux périodiques. — Voici d'abord la disposition qu'a adoptée la maison Favarger & C^{ie} pour résoudre le problème de la distribution de signaux horaires périodiques dans les écoles, les fabriques, les bureaux, etc.

Supposons d'abord qu'il s'agisse d'une école dans laquelle on veut que les heures d'entrées et de sorties de classe ainsi que les durées des récréations, soient annoncées dans le bâtiment par des sonnettes électriques trembleuses, et dans le préau par une cloche électrique à grande portée de son.

On place chez le concierge une horloge secondaire à minute, munie de contacts correspondant à l'horaire des leçons et des récréations. Ces contacts sont dits « de passage », parce qu'ils ne sont fermés que pendant le court instant où l'armature opère son changement de position.

Dans le préau, on installe une cloche électrique sur colonne semblable à celles qui sont couramment employées pour annoncer dans les gares les départs et les arrivées des trains. Son timbre, en fonte sonore, a un diamètre de 0^m50 et s'entend au loin. A chaque fermeture d'un contact de l'horloge secondaire, le mouvement à poids de la cloche est déclenché électromagnétiquement et un lourd marteau frappe sur le timbre 6 forts coups régulièrement espacés. En même temps, grâce à un contact auxiliaire que ferme le rouage de ce mouvement pendant les 8 à 10 secondes où il est actif, toutes les trembleuses réparties à l'intérieur du bâtiment scolaire et notamment dans les corridors des étages, tintent, et ainsi tout le monde, maîtres et élèves, en quelque endroit qu'ils se trouvent, est averti. Une seule pile locale de quelques éléments primaires suffit à actionner tous les appareils et peut fonctionner pendant plus d'un année, sans que l'on ait à s'en occuper. Toutefois, dans les installations les plus récentes, on supprime cette pile et l'on emploie le courant urbain d'éclairage directement, sans résistance ni transformateur, pour actionner aussi bien les trembleuses intérieures que la sonnette électrique extérieure à grand timbre ; celle-ci est ainsi substituée à la cloche sur colonne ; son marteau lourd est actionné par un moteur électrique branché sur le réseau d'éclairage et déclenché aux moments voulus par les contacts horaires. On obtient ainsi, pour toute l'installation, l'automatisme complète.

Dans les installations où la cloche à fort timbre n'est pas demandée et où l'on n'a que des sonnettes trembleuses, le contact de l'horloge secondaire agit sur un « relais de durée » qui, une fois en action, intercale les trembleuses pendant un temps limité de 8 à 12 secondes. On peut aussi supprimer ce relais de durée et adapter à l'horloge secondaire, non pas des contacts de passage, mais bien des contacts durant une minute entière (temps de repos de l'armature), et alors la durée de chacun des signaux donnés par les trembleuses est également d'une minute, mais, dans la plupart des cas, elle est considérée comme inutilement longue et même comme désagréable ; elle présente en outre l'inconvénient d'une trop grande dépense de courant.

L'horloge secondaire à contacts peut être disposée de façon à avoir :

Un seul horaire fixe se répétant tous les jours ;

un seul horaire fixe à période hebdomadaire, avec interruption des signaux le dimanche et changement de ceux-ci le samedi (semaine de travail dite « anglaise ») ;

deux horaires fixes (quotidiens ou hebdomadaires), l'un pour l'été, l'autre pour l'hiver, par exemple, avec passage non automatique d'un horaire à l'autre au moyen d'un commutateur à main ;

plusieurs horaires fixes pour des périodes quelconques, avec changements d'horaires par commutateur manuel ;

ou enfin n'importe quelles autres combinaisons entièrement ou partiellement automatiques, fixes ou variables à volonté (par déplacements de goupilles), etc.

Réveil-matin. — Dans un hôtel, le problème se pose d'une manière différente : il s'agit ici de signaux acoustiques capables de réveiller les voyageurs à une heure quelconque qu'eux-mêmes doivent pouvoir choisir en se couchant.

L'horloge secondaire, placée au bureau, ferme de quart d'heure en quart d'heure, par exemple (ou plus souvent, si c'est nécessaire), des contacts depuis 4 heures à 8 heures du matin (ou plus longtemps), intervalle qui suffit dans la plupart des cas.

Dans chaque chambre de voyageur se trouve un petit commutateur à main ayant autant de touches qu'il y a de quarts d'heure dans 4 heures, soit 16. Le levier tournant de ce commutateur peut être amené à la main sur l'une quelconque des 16 touches, celle correspondant à l'heure à laquelle on veut être réveillé. Les 16 heures auxquelles le réveil peut fonctionner sont naturellement inscrites à

côté des touches, qui sont disposées circulairement autour du centre du levier commutateur à manette. Au-dessus du commutateur est placée la petite trembleuse dont le tintement doit réveiller le voyageur.

16 fils électriques et un fil de retour commun relie l'horloge à contacts du bureau de l'hôtel avec les appareils des chambres à coucher, de telle façon que l'un quelconque des 16 contacts fermés par l'horloge fait tinter, pendant une minute, les trembleuses de tous les voyageurs qui, la veille, auront placé leur levier commutateur sur l'heure de ce contact. Le voyageur a, par le commutateur, la possibilité d'arrêter lui-même la sonnette, dès qu'il est réveillé.

Heures sonnées. — Une autre application des signaux acoustiques horaires est celle qui consiste à distribuer, dans divers locaux, non plus l'heure montrée sur des cadrans à minutes, mais bien les heures sonnées sur des timbres ou sur des tiges sonores.

Pour résoudre ce problème, on fait usage d'un relais électromagnétique muni d'une « roue de compte » ; celle-ci est solidaire d'un rochet que l'armature du relais actionne pour le premier de chaque série des coups à sonner, grâce aux contacts que l'horloge secondaire voisine ferme de demi-heure en demi-heure (respectivement de quart d'heure en quart d'heure), — et pour les coups suivants, grâce à un contact spécial que ferment les saillies, d'inégale longueur, de la roue de compte. Lorsque ce contact spécial cesse d'être fermé, la série de coups correspondante est terminée.

Les électro-aimants des appareils sonneurs sont intercalés en dérivation sur deux fils reliés à un contact court que ferme l'armature du relais à chacun de ses mouvements et qui lance le courant d'une pile locale (ou d'une dérivation prise sur les fils urbains d'éclairage), dans les électro-aimants. Les appareils sonneurs, qui sont le plus souvent de simples sonnettes électriques d'appartement à un coup (rendues non trembleuses par la suppression de leur contact d'armature), frappent alors électriquement, sur leur timbres ou sur les tiges sonores, les séries de coups inégales des heures et des quarts ou des demies.

Les cloches électriques de gares sur colonnes peuvent aussi être organisées de manière à sonner les heures et les quarts (les heures sur une cloche à simple timbre, les quarts sur une autre cloche à double timbre). Il suffit pour cela de compléter leurs mouvements à poids par un rochet, une roue de compte et un contact spécial et de les relier avec une horloge secondaire à deux séries de contacts

dont l'une déclanche, toutes les heures, la cloche à simple timbre, et l'autre, tous les quarts d'heure, celle à double timbre. Les électro-aimants et les armatures de ces cloches jouent alors le même rôle que les organes analogues du relais électromagnétique dont il a été parlé ci-dessus. Un contact répétiteur des coups frappés permet d'actionner autant de sonnettes à un coup que l'on voudra et de faire entendre ainsi l'heure sonnée dans divers locaux (classes d'écoles, auditoires d'Université, bureaux d'administrations, salles de fabriques, etc.). On voit, au milieu de la partie supérieure de la planche IV, deux cloches sur colonnes organisées pour frapper électriquement les heures sonnées; ces cloches sont commandées ici non pas par un cadran ordinaire à contacts, mais bien par une horloge secondaire de clocher, à poids et à aiguilles lourdes non protégées, semblable à celle déjà décrite à pages 336 et suivantes; c'est le rouage de cette horloge qui est muni des deux séries de contacts d'heures et de quarts chargées de déclancher, tour à tour, les mouvements des deux cloches. Les poids actionnant ces cloches et l'horloge secondaire elle-même peuvent être remontés automatiquement de la manière connue.

On voit par les exemples que nous venons de décrire et qu'illustre la planche IV, combien sont variées les combinaisons électromagnétiques que l'on peut réaliser au moyen des divers organes d'un système de distribution d'heure du type Favarger & C^{ie}, et combien ce système se prête, grâce à sa grande souplesse, à la résolution facile et pratique de n'importe quel problème où le temps joue un rôle.

D. Système d'unification de l'heure civile selon un autre type de la maison Favarger & C^{ie}, dans lequel les horloges-mères secondaires de quartiers sont maintenues automatiquement à l'heure par voie de synchronisation.

Ce système est une application généralisée du *Relais pendulaire* qui a été décrit à pages 398 et suivantes. La planche V représente schématiquement les appareils et les circuits d'une telle installation qui comprend :

1. A la Centrale :

1^o Une pendule fondamentale de haute précision, système Froment, type Abegglen-Favarger & C^{ie}, telle qu'elle a été décrite à page 264.

2° Deux relais pendulaires qui, placés de part et d'autre de la pendule fondamentale, sont synchronisés par celle-ci. Chacun de ces deux relais est muni :

- a) d'un interrupteur simple qui est fermé toutes les deux secondes et qui synchronise à son tour, de la manière connue, les balanciers des horloges-mères secondaires des quartiers éloignés de la centrale;
- b) de dix contacts-inverseurs de groupes à minutes, pouvant être chargés chacun à raison d'au moins 50 horloges secondaires à armatures polarisées (directement, soit sans relais ordinaires interposés);
- c) d'un échappement électrique à palette de Hipp, capable d'entretenir à lui seul, avec la collaboration de l'un des deux électro-aimants qui se trouvent à la partie inférieure (l'autre électre est celui qui reçoit les émissions synchronisantes), les oscillations du balancier du relais pendulaire, dans le cas où ces émissions seraient, pour une raison ou pour une autre, suspendues ou perturbées.

3° Une double batterie d'accumulateurs (l'une en charge, l'autre en décharge), fournissant le courant de tous les appareils de la centrale horaire proprement dite et de toutes les horloges secondaires à minutes des quartiers 1 et 2 voisins de cette centrale.

4° Un commutateur à trois positions qui permet de mettre le contact synchronisateur de la pendule fondamentale, soit sur l'un, soit sur l'autre des deux relais pendulaires, soit simultanément sur tous les deux.

5° Un commutateur à deux positions permettant de mettre les électro-aimants de synchronisation des horloges-mères secondaires des quartiers extérieurs (reliés par des *lacets* à la centrale) n° 3 à 8, soit sur le contact synchronisateur du relais pendulaire central de gauche, soit sur le contact synchronisateur du relais pendulaire central de droite.

6° Deux grands tableaux sur marbre (non représentés sur la pl. V) semblables à celui qui a été décrit sous chiffre 4 de la description d'une centrale horaire moderne (p. 418) et représenté sur les planches II et III. De ces deux tableaux l'un dessert les horloges secondaires à minutes du quartier n° 1 et l'autre celles du quartier n° 2.

II. Dans chacun des postes d'horloges-mères secondaires des quartiers extérieurs :

1° Une horloge-mère secondaire synchronisée identique à l'un des deux relais pendulaires de la centrale, avec cette différence que le contact synchronisateur peut être ici supprimé (à moins que l'extension du régime unifié à des quartiers suburbains ou de banlieue plus éloignés, n'engage à introduire, dans le système, des relais pendulaires ou horloges-mères secondaires synchronisées de 2^{me}, 3^{me}, etc., ordre) (comparer avec p. 402).

2° Un jeu de deux batteries d'accumulateurs (l'une en charge, l'autre en décharge).

3° Un tableau sur marbre semblable à ceux de la centrale (mentionnés sous 6 ci-dessus) et non représenté sur la planche V.

Ainsi que l'indique la planche V, on peut atteler sur un des *lacets* (ligne électrique à deux fils) partant de la centrale, les électroaimants de synchronisation de plusieurs horloges-mères secondaires de quartiers.

La présence à la station centrale urbaine d'une pendule de haute précision, base de tout le système, rend presque superflue une liaison électrique spéciale avec un observatoire astronomique voisin, la remise à l'heure de la pendule fondamentale pouvant être faite aussi souvent qu'on le voudra, soit par communication téléphonique urbaine ou interurbaine demandée avec cet observatoire, soit en captant au moyen d'une antenne appropriée et d'un téléphone-récepteur à haute résistance, les signaux horaires de l'une ou de l'autre des grandes stations radiotélégraphiques faisant ce service, soit enfin automatiquement, au moyen des appareils Straumann (voir à la fin du chap. X).

Le lecteur voudra bien prendre note ici que tous les appareils horaires secondaires à minutes tels qu'ils ont été décrits sous chiffre IV et V (p. 434 et suiv.) en regard de la planche IV, peuvent être commandés tels quels par chacun des postes secondaires représentés schématiquement sur la planche V. Que ces postes secondaires, en effet, soient remis à l'heure ou synchronisés par la station centrale urbaine, cela ne change rien aux appareils horaires des zones IV et V, qui restent identiques dans les deux systèmes.

E. Système de distribution électrique de l'heure civile appliqué ou en voie d'application dans la Ville de Paris.

Nous empruntons à l'opuscule que M. Jean Mascart, astronome à l'observatoire de Paris, a publié en 1907, et qu'il a intitulé : *L'Heure à Paris*, les renseignements suivants :

Sur l'initiative de Leverrier, une commission fut constituée le 11 août 1875 par le Préfet de la Seine avec, comme membres principaux : Leverrier, Wolf, Becquerel, Tresca, Du Moncel, Breguet. Des essais furent entrepris sur une assez grande échelle et le 22 janvier 1879, cette commission soumettait à l'approbation de l'Administration, un système général qui peut être résumé comme suit :

1^o A l'observatoire, une pendule directrice chargée de synchroniser, à distance, et plus ou moins directement, un certain nombre de pendules, appelées *Centres horaires*, qui furent réparties sur deux circuits dans les régions centrale et moyenne de Paris.

2^o Dans chacun de ces centres horaires, les organes capables de maintenir automatiquement à l'heure de l'observatoire un nombre quelconque d'horloges publiques pourvues elles-mêmes de dispositifs de remise à l'heure électromagnétique.

I. Synchronisation. — Voici, tout d'abord, comment fut réalisée la synchronisation des pendules des centres horaires. La méthode adoptée fut celle de Foucault, déjà appliquée précédemment par Wolf à l'observatoire de Paris, mais quelque peu modifiée par Leverrier et Breguet, en vue d'une distribution urbaine :

La pendule directrice de l'observatoire, maintenue continuellement à l'heure exacte du temps moyen et corrigée, lorsque c'est nécessaire, à l'aide de petits poids amovibles placés dans une coupelle du balancier, est munie d'un contact-interrupteur qui se ferme et s'ouvre une fois par seconde et qui a pour rôle unique de communiquer à l'armature d'un relais électromagnétique, un léger mouvement de va et vient. Cette armature bat ainsi la seconde. Deux de ses mouvements successifs d'aller et de retour sont utilisés pour libérer et arrêter tour à tour le dernier mobile, appelé *mouche*, d'un train d'horlogerie, mobile qui fait, chaque fois, un demi-tour rapide, puis s'arrête, et fait ainsi avancer d'une dent une roue dentée calée sur le mobile voisin de celui de la mouche ; c'est ce mouvement d'avance qui est employé pour fermer pendant un court instant un second contact, réglable en durée, qui commande un second circuit,

indépendant de celui du relais à mouche et de la pendule directrice. Dans ce circuit se trouvent intercalés les électro-aimants fixes synchronisant, de la manière connue, les balanciers de trois pendules, dont l'une est placée près de la porte de l'observatoire et dont les deux autres, dites *têtes de lignes*, commandent, la première, le circuit des centres horaires de l'Ouest, et la seconde, celui des centres horaires de l'Est ; chacune d'elles est munie, dans ce but, d'un interrupteur semblable à celui de la pendule directrice. Le résultat général obtenu au moyen de cette organisation est que les balanciers des trois pendules synchronisées de l'observatoire et de toutes celles des centres horaires battent à l'unisson avec le balancier de la pendule directrice en indiquant continuellement le temps moyen, exact à une très petite fraction de seconde près.

« L'observatoire de Paris, dit M. Mascart, s'efforça toujours d'améliorer progressivement ce service horaire, et par une marche toujours plus correcte de la pendule directrice, et par des modifications mécaniques de détails reconnues utiles.

« L'amélioration la plus importante fut l'institution d'un service de contrôle central permettant de surveiller, du poste de l'observatoire, la marche des diverses pendules des circuits, amélioration qui fut étudiée et réalisée par Breguet. »

En voici le principe :

Chaque fois que, dans le cours d'une même minute, l'aiguille des secondes de la pendule synchronisée d'un centre horaire saute sur la seconde 10, par exemple, elle coupe elle-même, au moyen d'un dispositif automatique facile à concevoir, le courant synchronisateur pendant la durée de cette même seconde 10, mais le rétablit pour toutes les autres secondes de la même minute. A l'observatoire, l'aiguille d'un galvanoscope, inséré dans le circuit à côté de la pendule formant tête de ligne, oscille régulièrement à chaque seconde, sauf à la seconde 10 coupée.

Il est clair, dès lors, que si l'oscillation manquée sur le galvanoscope a lieu au moment précis où l'aiguille des secondes de la pendule tête de ligne saute elle-même sur la seconde 10, il y a accord parfait entre les deux pendules et l'employé de l'observatoire peut ainsi constater que le centre horaire en cause est en ordre. Par contre, si l'aiguille du galvanoscope cessait d'osciller quand la pendule tête de ligne bat 8, par exemple, cela indiquerait à cet employé que le centre horaire est en avance de deux secondes sur l'observatoire.

La marche, correcte ou non, des autres centres horaires, se véri-

fié de la même façon en assignant à chacun d'eux sa seconde spéciale de contrôle galvanoscopique.

Toutes les pendules dont il vient d'être parlé sont à moteur (poids ou ressort) et à échappement mécanique et les émissions de courant dont l'origine est, en fin de compte, la pendule directrice, n'ont d'autre fonction que de synchroniser tous les balanciers. Si donc, pour une raison ou pour une autre, ces émissions venaient à manquer d'une manière permanente, il n'en résulterait pas un arrêt du système, mais seulement une marche un peu moins régulière.

Toutefois, si l'on veut, ce qui est désirable, que les passants qui consultent un centre horaire apprennent, d'un seul coup d'œil, que l'heure indiquée par lui n'est pas absolument conforme à celle de l'observatoire, il faudra compléter le système de contrôle central décrit ci-dessus, par un système analogue ou plutôt réciproque, dans lequel ce sera la pendule tête de ligne qui coupera elle-même le courant synchronisateur de son circuit, à chacune des secondes prédéterminées déjà choisies pour le contrôle, par l'observatoire, des divers centres horaires, et alors on n'aura qu'à placer dans chacun de ceux-ci, un galvanoscope dont l'aiguille oscillera à toutes les secondes, sauf à celles où, pour un des circuits donnés, le courant synchronisateur est coupé, par l'observatoire, au premier, deuxième, etc., centre horaire de ce circuit.

Si l'aiguille galvanoscopique du centre horaire en cause n'oscille plus du tout, cela indiquera une rupture de fil dans le circuit ou une perte importante à la terre ; le centre alors ne recevant plus (ou trop peu) de courant, n'est plus *dirigé*, il s'emballe librement¹ et son heure n'est plus garantie. Un observateur attentif placé devant un centre horaire, le premier par exemple, pourrait même en apprendre davantage : si les arrêts temporaires de l'aiguille galvanoscopique ne se produisaient pas aux secondes qui conviennent à ce premier centre et dont le public est censé connaître le rang, c'est que les centres horaires seraient décalés les uns par rapport aux autres, avec la possibilité, cependant, que le centre observé soit lui-même juste. Toutefois, écrit M. Mascart, « on ne peut demander au passant de se préoccuper de tout le circuit, il se perdrait dans les suppositions ».

Le mieux sera sans doute de se borner à provoquer dans chacun des centres horaires, au moment où il devient fautif, la chute auto-

¹ Dans le système de synchronisation à 2 électro-aimants adopté à Paris, les pendules synchronisées doivent être réglées en légère avance sur la directrice (p. 343).

matique et permanente d'un *voyant rouge* que l'horloger-surveillant du système aura à relever à la main après avoir écarté le défaut.

D'autres dispositifs ingénieux ont été étudiés et essayés pour réduire au minimum les cas où, une perturbation quelconque du système de synchronisation se produisant (arrêt du relais à mouche, faute de ligne, intensité de courant insuffisante, etc.), l'heure indiquée par le cadran de la pendule d'un centre horaire n'est plus exacte, et où le public doit en être avisé automatiquement dans le plus bref délai possible.

Nous ne pouvons entrer ici dans de plus longs développements ; on trouvera ceux-ci exposés d'une manière détaillée dans la brochure de M. Mascart.

II. Appareils secondaires dépendant des centres horaires.

— La même brochure donne quelques rapides indications sur la manière dont les horloges publiques, déjà existantes ou à installer, sont ou pourront être à l'avenir unifiées par les divers centres horaires.

« Imaginons, écrit M. Mascart, ces horloges reliées électriquement à une pendule qui, placée à l'Hôtel de ville, serait centre horaire dirigé par en bas, et productrice d'émissions par en haut ¹. Toutes les douze heures, de 11 heures 57 minutes à 11 heures 58 minutes, cette nouvelle directrice enverrait un courant d'une durée de une minute dans les circuits qui dépendent d'elle. »

C'est ce courant qu'il s'agit d'utiliser, pour remettre à l'heure exacte, deux fois par 24 heures, des horloges secondaires, dont les cadrans indiqueraient, sans cela, une heure différente de celle de l'observatoire. Cette utilisation peut se faire de plusieurs manières dont nous mentionnons ici les deux suivantes :

Dans l'une d'elles, on règle légèrement sur l'avance les horloges secondaires ; il ne s'agit plus alors que d'arrêter celles-ci pendant quelques secondes, pour leur faire perdre cette avance, puis de les remettre en marche au moment précis où elles sont d'accord avec le centre horaire ; tout cela a lieu automatiquement, l'arrêt, par les horloges secondaires elles-mêmes au moment où leurs aiguilles indiquent 11 h. 58 m., la mise en marche, au moment où le centre ho-

¹ Il faut se rappeler ici que les électro-aimants synchronisateurs du système Wolf-Breguet sont placés au nombre de deux à la partie inférieure de la pendule dirigée (p. 343) ; par contre, les contacts-interrupteurs que celle-ci doit fermer et ouvrir pour actionner à son tour les dispositifs de maintien à l'heure des horloges publiques, sont ordinairement placés à la partie supérieure de la pendule, soit sur le mécanisme qui est derrière le cadran, soit dans le voisinage immédiat de la suspension du balancier.

raire atteignant, lui aussi, cette même heure, coupe son courant.

Dans l'autre solution, le courant, envoyé par le centre horaire à 11 h. 57 m., amène rapidement les aiguilles des horloges secondaires sur 11 h. 58 m. de leurs cadrans (quel que soit d'ailleurs l'écart qu'elles présentent à cet instant avec l'heure exacte), et les arrête ensuite pour les laisser repartir, par la cessation du courant, à 11 h. 58 m. Ce second procédé pourrait, au besoin, corriger l'avance et le retard.

La correction indifférente de l'avance et du retard est, selon M. Mascart, un problème délicat, mais elle offre l'avantage de ne pas avoir à dérégler les horloges secondaires, en les faisant avancer systématiquement (comparer avec p. 339 et suiv.).

F. Système de distribution électrique de l'heure civile de la maison Siemens et Halske¹.

Dans ce système, l'horloge-mère principale est munie d'un échappement électrique à palette de Hipp et d'un appareil à contacts-inverseurs que ferme, une fois par minute, une roue d'échappement de 60 dents faisant un tour en deux minutes, et cela d'une manière analogue, en principe, à celle qui est décrite à page 359, en regard de la figure 256 (voir aussi à p. 377).

Les horloges secondaires sont des compteurs électrochronométriques à armatures polarisées oscillantes dont le mécanisme a été décrit à page 341.

La caractéristique principale du système Siemens et Halske ici mentionné, est l'emploi d'une horloge-mère secondaire (Relais-Hauptuhr) qui peut être intercalée en n'importe quel point du réseau des fils secondaires de l'horloge-mère principale, comme un simple compteur électrochronométrique, et qui reçoit ainsi de celui-ci, à chaque minute, une émission de courant utilisée pour remettre à l'heure, instantanément, l'horloge-mère secondaire. Cette dernière est d'ailleurs identique, comme construction et fonctionnement, à l'horloge-mère principale et peut marcher indépendamment, même dans le cas où les émissions correctrices viendraient à manquer momentanément.

On voit que la maison allemande a cherché ici à atteindre le même but que Hipp s'était proposé d'obtenir autrefois et dont la figure 282 de la page 394 donne une idée suffisante.

¹ ZACHARIAS : p. 415 et 446.

Les figures 295 et 296, empruntées au livre de M. l'ingénieur Zacharias, représentent schématiquement les organes principaux d'une horloge-mère secondaire Siemens et Halske.

Sur l'axe de la roue d'échappement *a*, faisant un tour en deux minutes, est calée l'armature en fer doux *L* dont les deux extrémités passent, sans les toucher, tout près des pôles d'un électro-aimant

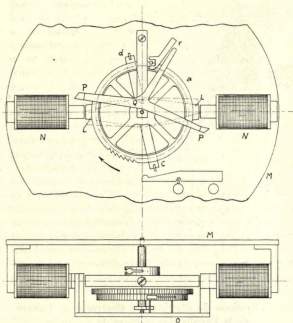


Fig. 295

fixe *N* ; la culasse de ce dernier est constituée par la plaque en fer *M* qui porte tout le mécanisme. Une seconde armature en fer doux *O*, à extrémités repliées, est fixée sur un levier à trois branches *P*, qui est pivoté en *Q* et dont le bras supérieur peut, lorsque les extrémités *O* sont attirées par les pôles de *N*, agir sur le frein *r* et libérer ainsi la roue d'échappement *a* solidaire du tambour sur lequel presse, en temps ordinaire, le levier-frein *r*.

Si, au cours d'une minute quelconque, l'horloge-mère secondaire

a retardé quelque peu, et si, par conséquent, l'armature *L* occupe, au moment où se produit l'émission de courant lancée par l'horlogemère principale, la position inclinée représentée en pointillé sur la figure 295, cette émission aura pour effet d'amener brusquement

L dans la position horizontale (traits pleins), c'est-à-dire celle où l'horlogemère secondaire ayant rattrapé son retard, est de nouveau à l'heure exacte de l'horlogemère principale.

Si, au contraire, celle-là a pris de l'avance sur celle-ci, c'est la seconde armature *O* qui, après

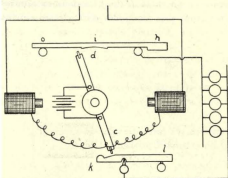


Fig. 296

avoir écarté le frein *r*, fait reculer la roue *a* de la quantité voulue. Le bras de contact *cd* (fig. 295 et 296) accompagne *a* dans ses mouvements et par conséquent est lui-même aussi remis à l'heure.

La fig. 296 représente l'appareil à contacts fixe *hio* et *lk* sur lequel frottent, en passant, les extrémités platiniées du double bras tournant *cd*, et donne la disposition des fils de communication reliant l'horlogemère secondaire, d'une part avec l'horlogemère principale, et d'autre part avec sa pile-relais et avec ses propres horloges secondaires.

G. Système de distribution électrique de l'heure de la Faculté des sciences de Marseille.

M. Stephan, directeur de l'observatoire de Marseille, a écrit pour l'ouvrage de M. P. Decressain : *L'horlogerie électrique à l'Exposition universelle de 1900*, déjà cité plus haut, un article intéressant duquel nous extrayons les renseignements suivants :

Indications générales. — Dans le vestibule d'entrée de la Faculté des Sciences où le public est librement admis, est installée une pendule à battement de seconde, réglée sur le temps moyen du fuseau horaire de l'Europe occidentale. Cette pendule, synchronisée électriquement par une autre pendule, la régulatrice, placée à l'ob-

servatoire, peut être considérée dans la pratique comme dénuée de toute « correction », c'est-à-dire comme fournissant à tout instant l'heure exacte. Les horloges et les marins ont ainsi la facilité, dont ils profitent largement, de régler leurs chronomètres, en un point central de la ville et à toute heure de la journée, avec une exactitude absolue. En outre, le battement de seconde peut être transmis électriquement aux diverses salles de la Faculté.

La synchronisation de la pendule de la Faculté par celle de l'Observatoire, est obtenue par le procédé bien connu sous le nom de « système Foucault-Vérité » ; l'organisation chronométrique dont il est ici question ne présente à cet égard qu'une particularité nouvelle sur laquelle on reviendra tout à l'heure. Il en est tout autrement du moyen par lequel on maintient constamment à l'heure exacte la régulatrice de l'Observatoire. La permanence du réglage résulte d'un dispositif, réalisé pour la première fois à Marseille par l'éminent artiste Fénon, à la demande du directeur de l'Observatoire. Ce dispositif sera décrit plus loin avec quelques détails.

Des appareils téléphoniques, placés sur les côtés des pendules de l'Observatoire et de la Faculté, permettent de les comparer d'une manière prompte et commode.

Pendule de la Faculté. — La figure 297 montre qu'elle est de construction très simple. La tige de son balancier est en sapin ; elle porte à sa partie inférieure deux palettes de fer doux *AA* qui se

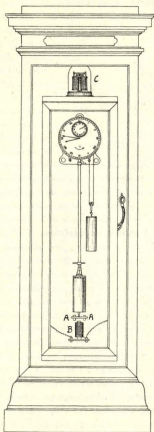


Fig. 297

trouvent alternativement à très faible distance des pôles d'un électro-aimant *B*, quand le balancier est à l'une ou à l'autre des limites de sa course oscillatoire. A cet instant, un courant émis par la régulatrice et d'une durée de un dixième de seconde environ, passe dans les bobines de *B*. La petite attraction ainsi produite suffit pour entrete-

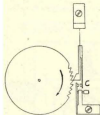


Fig. 298

nir la synchronisation ; on peut même faire varier la marche diurne de la régulatrice de plus de dix secondes en plus ou en moins sans que l'accord des deux pendules cesse de se maintenir. Tel est le procédé Foucault-Vérité ; mais on adaptait autrefois une seule palette dans l'axe du balancier en regard de deux électro-aimants placés de part et d'autre de la verticale. La disposition à deux palettes et à un seul électro-aimant, due à M. Fénou,

n'exige qu'un courant d'une intensité moitié moindre.

Au-dessus du cabinet intérieur de la pendule est un relais *C*, traversé par le courant de la régulatrice et qui bat la seconde ; le circuit secondaire de ce relais permet de transmettre le battement en un point quelconque de la Faculté.

Pendule régulatrice. — Elle est aussi de construction simple, mais très soignée : son balancier est une tige d'acier supportant un cylindre creux de fer noirci à l'extérieur et partiellement rempli de mercure, à l'intérieur, pour la compensation thermométrique ; l'échappement est à ancre sans aucune particularité spéciale. A chaque seconde, le rouage communique un petit mouvement angulaire à une roue à rochet, qui ferme chaque fois, pendant un dixième de seconde environ, un contact-interrupteur *C* (fig. 298), et produit ainsi les émissions synchronisatrices circulant dans la ligne Observatoire-Faculté.

Voici maintenant quel est le dispositif spécial au moyen duquel on maintient à l'heure exacte la régulatrice de l'Observatoire. Sur la tige cylindrique, en acier parfaitement poli du balancier de cette pendule, peut glisser un curseur en laiton *B*. Ce curseur, représenté de profil et de face (fig. 299), est supporté par un fil en bronze silicié de un dixième de millimètre d'épaisseur qui, à sa partie supérieure, s'enroule dans les spires d'un cylindre horizontal finement fileté. Il est clair qu'il suffit de faire tourner l'axe de ce cylindre, dans un sens ou dans l'autre, pour déplacer le curseur vers le haut ou vers le bas du balancier et pour modifier ainsi à son gré la durée des oscillations. L'une des extrémités de l'axe du cylindre fileté tra-

verse la caisse de la pendule et porte un tambour gradué *T* (fig. 299 et 300). On peut dès lors procéder à coup sûr. On sait que quand on fixe, d'une manière quelconque, une masse additionnelle sur le balancier d'une horloge à une distance du point de suspension inférieure à la longueur du pendule simple, on accélère sa marche ; toutefois la hauteur où l'on place la masse additionnelle n'est pas indifférente. Il existe une position, peu distante du milieu du balancier, où l'effet de cette masse est maximum. Si l'on s'écarte graduellement de ce point, soit vers le haut, soit vers le bas, l'accélération va en *diminuant*, de telle sorte que, sauf pour celui où l'accélération est maximum, il y a toujours deux points où une même masse additionnelle produirait la même accélération.

Au début, le curseur étant placé à peu près au quart de la verge du balancier, en partant du haut, on a réglé la position

de la masse principale de façon à avoir une marche presque parfaite. Cela fait, pour ralentir un peu la marche, il suffit de remonter le curseur, tandis que par la manœuvre inverse, on l'accélère.

Jusqu'ici, la masse additionnelle n'avait été employée que pour parachever le réglage d'une manière permanente¹. Ce qui constitue

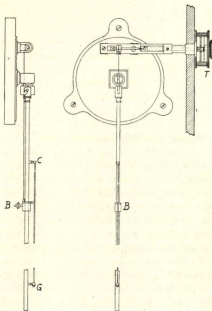


Fig. 299

¹ Cette remarque n'est pas tout à fait juste ; on a pu voir en effet que Tresca et Redier ont appliqué, il y a longtemps, le principe du curseur mobile le long de la tige d'un balancier oscillant (p. 342).

la nouveauté et l'originalité du curseur ci-dessus décrit, c'est sa mobilité.

Il était, en effet, audacieux d'apporter au pendule régulateur, la complication d'une pièce mobile. Néanmoins, en dépit de cette cause apparente de trouble, la pendule Fénon de l'Observatoire de Marseille a une marche comparable à celle des meilleures horloges connues. Si cet excellent résultat a été obtenu, c'est grâce à deux précautions prises par l'artiste : 1^o le curseur est guidé par une tige verticale *CG* (fig. 299), qui s'oppose au mouvement de rotation de ce petit poids autour de la verge du balancier ; 2^o le fil de bronze silicié glisse sans jeu, entre deux pierres dures, au niveau de la ligne de flexion des lames de suspension du balancier. En outre et surtout, on doit tenir compte de l'habileté exceptionnelle du constructeur.



Fig. 300

Réglage quotidien des horloges. — Voici maintenant la façon dont on procède pour maintenir les horloges à l'heure exacte : chaque jour, à 9 heures du matin, l'Observatoire compare la régulatrice de temps moyen à une pendule sidérale dont l'état est fourni par l'observation méridienne des astres. On constate ainsi que la régulatrice est en avance ou en retard de deux dixièmes de seconde, par exemple ; on déplace alors légèrement le curseur, de manière à gagner ces deux dixièmes en 24 heures ; la pendule synchronisée de la Faculté s'adapte facilement à cette rectification.

En fait, depuis son installation ¹, la pendule de la Faculté n'a jamais été en écart de plus de un ou deux dixièmes de seconde, abstraction faite de l'erreur toujours minime qui peut entacher l'indication de la pendule sidérale et des perturbations, très rares d'ailleurs, produites par des causes accidentelles indépendantes du mode de réglage, telles que rupture de fils, arrêts volontaires pour expériences spéciales ou nettoyage des instruments. On peut donc dire que le résultat obtenu est très satisfaisant. Il serait aisé de réduire encore l'erreur de la pendule, de la maintenir par exemple au-dessous de un dixième de seconde ; mais dans la pratique la précision actuelle suffit.

Piles et circuits. — Les courants voltaïques employés dans l'installation ci-dessus décrite, sont très faibles : le relais de la

¹ Exécutée sauf erreur en 1892.

régulatrice est animé par un seul élément Callaud grand modèle ; quant au courant qui circule entre l'Observatoire et la Faculté, il est fourni par quatre éléments Meidinger associés en tension.

Le circuit est constitué par deux fils sous plomb qui, dans la presque totalité de leur parcours, longent les murs des égouts et, aux deux extrémités de la ligne, passent sous terre dans des tuyaux de poterie.

Conclusion. — Le problème de la conservation de l'heure exacte au moyen d'une pendule synchronisée électriquement, a reçu sa solution avant que l'on s'en occupât à l'Observatoire et à la Faculté des sciences de Marseille. Leverrier notamment a imaginé un système qui est appliqué depuis très longtemps à l'Observatoire de Paris et dans lequel le réglage de la pendule régulatrice est obtenu en ajoutant ou enlevant des petits poids marqués, dans une cupule fixée au balancier. Cette manœuvre a l'inconvénient d'exiger l'ouverture de la caisse de la pendule et une assez grande dextérité manuelle ; de plus, la méthode ne permet pas de faire varier la marche avec une continuité parfaite.

Ce qui a été réalisé à Marseille ne constitue qu'un premier pas vers un but plus important, qui est d'étendre la distribution de l'heure à d'autres points de la ville et en particulier à la ligne des ports ; mais l'exécution complète de ce projet est subordonnée au concours pécuniaire des pouvoirs qui sont intéressés à sa réalisation.

H. Appareils à signaux horaires.

Nous avons déjà vu (p. 436 et suiv.), à l'occasion de la description de l'un des systèmes de distribution d'heure de la maison Favarger & C^{ie}, comment on peut commander, au moyen de contacts dits « horaires » adaptés le plus souvent à des compteurs électrochronométriques et parfois aussi, soit à des horloges indépendantes, soit à des horloges-mères primaires ou secondaires, — des appareils fournissant des signaux périodiques, acoustiques ou optiques. Nous donnerons, dans le présent paragraphe *H*, la description d'appareils à signaux horaires, tels qu'ils ont été étudiés et réalisés par divers autres constructeurs. Mais nous consacrerons auparavant quelques lignes aux considérations générales suivantes.

Laissant de côté le problème de la distribution des heures, demi-heures et quarts d'heure sonnés, qui a déjà été traité à page 438, nous revenons ici, avec plus de détails, à la question beaucoup plus

importante de la distribution, dans les divers locaux d'un établissement scolaire, industriel, commercial, administratif, hospitalier, etc., de signaux périodiques destinés à régler, jusque dans les moindres détails, l'activité du personnel qui y est occupé. Ces signaux sont le plus souvent *acoustiques* et sont produits par des sonnettes trembleu-

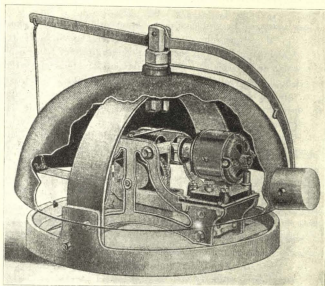


Fig. 301

ses, par des cloches électriques à grande portée de son, par des sifflets à vapeur, par des sirènes plus ou moins bruyantes, etc., tous appareils que mettent en action, aux moments voulus, soit directement, soit par déclenchement, les émissions de courant expédiées par l'horloge à contacts qui les commande.

Les trembleuses électriques sont connues de chacun ; elles peuvent, selon la grandeur de leurs timbres et l'énergie plus ou moins grande de leurs marteaux mus électromagnétiquement, être entendues à petite ou à moyenne distance. Les cloches, les sifflets, les sirènes, par contre, sont construits pour être perçus à grandes distances ; la force qui les met en action est le plus souvent déclanchée par le

courant des contacts horaires, directement ou par l'intermédiaire de relais électromécaniques ayant un contact secondaire capable de livrer passage aux courants des réseaux urbains de force ou de lumière. La figure 301, empruntée à l'ouvrage, déjà cité ailleurs, de M. Gust. Krumm, montre la disposition d'une forte cloche système

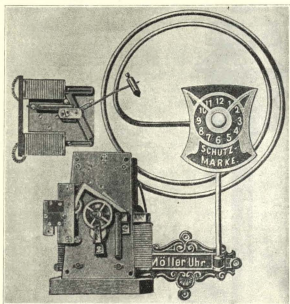


Fig. 302

Bohmeyer dont le marteau est actionné mécaniquement par un petit moteur électrique rotatif.

Dans la figure 302, qui représente un dispositif de la maison Möller et qui est tirée du même ouvrage, l'organe sonore est un ressort spiral tel que ceux dont les fabricants de la Forêt-Noire se servent pour les sonneries d'heures de leurs horloges mécaniques ; dans l'appareil Möller, le marteau est actionné directement par l'armature à longue course d'un électro-aimant ordinaire à courant de pile.

Enfin les figures 303 et 304 tirées de l'un des catalogues de la mai-

son Favarger & C^{ie}, donnent l'aspect extérieur de deux espèces de cloches électriques dites « allemandes » avec moteurs à poids, que

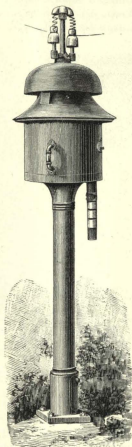


Fig. 303

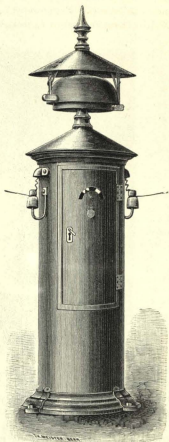


Fig. 304

cette maison emploie couramment dans ses installations de signaux horaires automatiques. On voit sur la figure 303 un indicateur à index qui, montant et descendant le long d'une échelle verticale, permet

de reconnaître, d'un seul coup d'œil, la position plus ou moins haute qu'occupe le poids moteur dans l'intérieur de la colonne-support, et par conséquent le moment où, près d'arriver à fin de course, il doit être remonté.

Lorsque les signaux horaires distribués sont *optiques*, ils sont ou bien *fugitifs* (voyants apparaissant dans des guichets, aiguilles parcourant plus ou moins rapidement les divisions de leurs cadrans et donnant, en petites fractions de temps, les instants et les durées exactes d'un ou de plusieurs phénomènes, etc.), ou bien *inscrits* d'une manière permanente sur une surface d'enregistrement, animée elle-même d'une vitesse de translation proportionnelle au temps et enregistrant ainsi la courbe, plus ou moins accidentée, des variations (en intensité, en niveau, en nombre, en vitesse, etc.) d'une quantité quelconque, que l'on a intérêt à étudier scientifiquement ou industriellement.

Quant aux horloges produisant les contacts horaires et *transmettant* ainsi aux divers appareils *récepteurs* que nous venons de passer rapidement en revue, les émissions de courant mettant ceux-ci en action, elles peuvent être, avons-nous vu, ou indépendantes, ou mères, ou secondaires. Dans ces trois cas, elles sont munies d'un appareil à contacts qui peut être simple ou compliqué. Il est simple quand les émissions de courant périodiques qu'il envoie sont séparées par des intervalles de temps réguliers et relativement courts, et alors celles-ci sont produites par l'action d'un seul des mobiles de l'horloge, toutes les secondes par exemple, ou toutes les minutes ; dans ce cas un seul contact suffit généralement à régler les instants et la durée de chaque émission. Par contre, lorsque les intervalles séparant deux ou plusieurs signaux consécutifs sont relativement longs, ou tantôt longs et tantôt courts, ou lorsque la période de temps constituée par une série de signaux horaires, varie quotidiennement, hebdomadairement, mensuellement, etc., l'appareil à contacts devient compliqué, et alors la coopération de plusieurs des mobiles de l'horloge, à vitesses différentes, est nécessaire pour assurer la succession correcte des signaux ou leurs durées plus ou moins régulièrement longues, courtes ou variables.

Une nouvelle complication vient en outre s'ajouter à celles déjà signalées, lorsque les horaires des signaux, au lieu d'être invariables, doivent être changés à tout instant, à la volonté du client.

Les combinaisons de signaux que l'on peut ainsi réaliser étant variées à l'infini, nous ne pouvons les traiter toutes en détail et nous

hh_1 , ainsi fermé tous les quarts d'heure, ne ferme *effectivement* le circuit du récepteur (sonnette trembleuse, etc.) qu'à certaines heures choisies au gré du client, il faut l'inclure dans un second contact cl placé en série avec hh_1 et disposé de la manière suivante : une roue à rochet R fait un tour en 24 heures, poussée qu'elle est d'une dent, par la goupille i , chaque fois que la roue de renvoi qui porte celle-ci fait elle-même un tour, c'est-à-dire à chaque quart d'heure. Le rochet R , divisé par des traits radiaux numérotés de quart d'heure

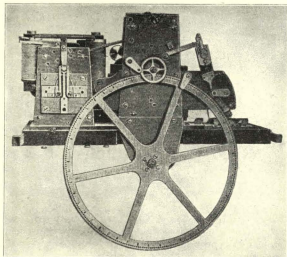


Fig. 307

en quart d'heure, peut alors recevoir, sur sa face, autant de goupilles que l'on veut avoir de signaux en 24 heures. Chacune de ces goupilles pousse, en passant, le talon n d'un levier horizontal enc et ferme ainsi pendant une durée supérieure à celle du premier contact hh_1 , le second contact cl ; la trembleuse ne tinte que lorsque les deux contacts sont fermés simultanément.

Si le contact hh_1 , au lieu d'être fermé tous les quarts d'heure, l'était toutes les dix, cinq, deux ou même (cas extrême) toutes les minutes, ce qu'on peut obtenir soit en augmentant en conséquence le nombre des ressauts de l'excentrique e , soit en plaçant celui-ci,

laissé à un seul ressaut, sur un mobile plus rapide, on pourrait porter respectivement à

$$24 \times 6 = 144$$

$$24 \times 30 = 720$$

$$24 \times 12 = 288$$

$$24 \times 60 = 1440$$

le nombre des trous de goupilles à percer sur la face de la roue *R* de 24 heures, et alors le client aurait la faculté de faire tinter automatiquement la sonnette-trembleuse (ou tout autre récepteur), à

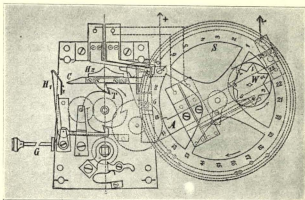


Fig. 308

n'importe laquelle des périodes de 10, 5, 2, 1 minutes, renfermées dans un jour de 24 heures.

Le diamètre de la roue *R* doit, cela va de soi, être d'autant plus grand que le nombre des trous de goupilles à juxtaposer sur sa face, le plus près possible de sa périphérie, est lui-même plus grand. Pour éviter cependant que cette roue ne devienne par trop encombrante, on peut répartir les trous sur deux (ou plus) circonférences différant légèrement entre elles en diamètre, et modifier en conséquence les leviers de contacts correspondants.

Lorsque la succession quotidienne des signaux horaires doit être automatiquement modifiée le samedi et interrompue le dimanche (cas fréquent dans les établissements où l'on a introduit la semaine de travail dite « anglaise »), il faut ajouter au rouage de l'horloge à contacts un mobile ne faisant qu'un tour en sept jours ; cette adjonction se fait facilement au moyen d'une goupille spéciale qui, placée sur la

roue *R* de 24 heures, travaille sur les dents triangulaires d'une étoile à 7 branches, d'une manière analogue à celle dont la goupille *i* de la figure 306 travaille sur les dents du rochet *R*.

Les figures 307, 308 et 309, toutes empruntées à l'ouvrage de

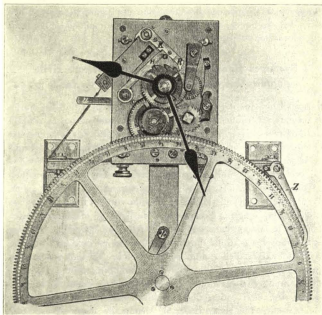


Fig. 309

M. Gust. Krumm, donnent une idée de quelques-unes des combinaisons d'horloges à contacts horaires telles qu'on les retrouve le plus fréquemment dans la pratique :

Horloge à contacts horaires, système Möller, pour signaux de 5 en 5 minutes (288 par 24 heures).

Horloge à contacts horaires, système Hahn, avec une étoile à 7 dents pour signaux à période hebdomadaire et pour 2 circuits extérieurs à horaires différents.

Horloge à contacts, système Bohmeyer, pour signaux de 5 en 5 minutes.

Les combinaisons d'horaires peuvent être infiniment variées. Rien n'empêche, entre autres moyens, de commander, à l'aide d'une seule et même horloge à contacts, plusieurs circuits ayant chacun son horaire spécial différent de ceux des autres circuits, soit en instants, soit en durées, de porter par exemple à 2, 3, etc., semaines la longueur de la période de succession des signaux, soit par dispositifs automatiques, soit par commutateurs manuels à déplacer à chaque saison.

I. Systèmes d'unification électrique de l'heure civile applicables à des lignes de chemin de fer.

Jusqu'ici nous avons admis que la zone de répartition des horloges secondaires unifiées s'étendait tout autour du centre d'unification, dans les diverses directions de la rose des vents et que cette zone couvrait une surface de ville ou de pays plus ou moins grande et à densité de répartition plus ou moins uniforme.

Le problème de l'unification électrique de l'heure change quelque peu de nature, lorsque les horloges secondaires sont réparties, souvent à de grandes distances les unes des autres, dans les diverses stations d'une ligne ou d'un tronçon de ligne de chemin de fer.

Lorsque la ligne à desservir ainsi est relativement courte et qu'en même temps ses stations sont importantes et nécessitent l'installation dans chacune d'elles d'un certain nombre de cadrans unifiés, directement exposés aux regards d'un nombreux public voyageur ou d'un nombreux personnel d'agents (cadrans de quais, de salles d'attente, de façades, de halles intérieures, de bureaux, de guichets, d'ateliers de réparations, de dépôts de locomotives, etc.), — il y a avantage à relier entre elles les stations par une ligne télégraphique spéciale à deux fils isolés, de préférence souterraine, et qui est exclusivement réservée au service horaire du tronçon de chemin de fer en cause.

Dans ces conditions, il est tout indiqué de se servir, pour maintenir à l'heure exacte les horloges-mères actionnant dans chacune des stations les compteurs électrochronométriques à minutes, — du système de la *synchronisation* tel qu'il a été exposé à page 342. C'est ce qui a été fait par l'auteur, lorsque sa maison de Neuchâtel, dirigée alors par Hipp, a été chargée de fournir le réseau des horloges électriques du chemin de fer métropolitain de la ville de Berlin (Berliner Stadtbahn).

Dans chacune des sous-stations de cette ligne, au nombre de huit, a été installée une horloge-mère électrique à palette de Hipp, semblable en principe à celle qui a été décrite à page 232 et suiv., mais disposée cependant, en ce qui concerne l'échappement électrique, quelque peu différemment.

La figure 310, qui représente schématiquement l'une d'elles, fait voir :

1) que cet échappement *s* est du type à palette « debout », décrit à pages 240 et suivantes, à l'occasion de la pendule de haute précision de Hipp ;

2) que le pendule *bb* est à double tige ;

3) que l'armature oscillante et le dispositif électromagnétique qui l'influence, se trouvent non pas à l'extrémité inférieure de l'instrument, mais bien à mi-hauteur environ, cette armature *a* oscillant, comme dans le cas de ladite pendule de précision, entre les pôles en fer doux *ee*₁ de ce dispositif ;

4) que la bobine supérieure *e* de ce dernier est seule intercalée dans le circuit local de l'échappement électrique et de la pile correspondante *B* ;

5) qu'enfin la bobine inférieure *e*₁ se trouve dans le circuit de ligne *L* où circulent les émissions du courant synchronisateur, lancées à chaque seconde par la pendule directrice.

Cette dernière, installée dans la neuvième station, est elle-même une horloge-mère à déclenchement de Hipp. Le contact-interrupteur provoquant ces émissions est du type à triple lamelle déjà décrit ailleurs ; toutefois, il n'est pas employé ici comme inverseur. La figure 311 montre que le mode d'intercalation choisi pour les horloges-mères synchronisées *u*₁, *u*₂, etc., est celui en dérivation. L'émission synchronisante se produit au moment où le balancier *P* de la pendule directrice, en arrivant dans sa position verticale, réunit métalliquement les lamelles *h* de gauche avec les lamelles *h*₁

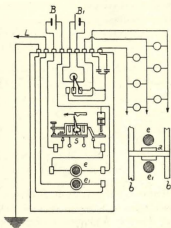


Fig. 310

de droite. Les vis f, f_1 , permettent de régler très exactement la durée de cette émission, qui est au plus d'un dixième de seconde.

Lorsque la ligne de chemin de fer à desservir est, contrairement à ce qui a lieu au Métropolitain de Berlin, d'une longueur relativement grande, il faut, pour éviter les frais considérables que provoquerait la pose d'une ligne électrique spécialement destinée au seul service horaire, utiliser les fils déjà existants qui relient entre elles les diverses stations et qui actionnent normalement leurs appareils télégraphiques.

La figure schématique n° 312, tirée de l'ouvrage de M. l'ingénieur

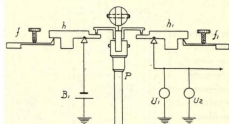


Fig. 311

Zacharias, déjà maintes fois cité au cours de ce livre, fait voir comment la société Normal-Zeit de Berlin a résolu le problème qui nous occupe ici.

Le procédé employé par elle est celui de la « remise

à l'heure » qui permet de n'utiliser, pour le service horaire, la ligne télégraphique la moins chargée, que 3 fois par 24 heures, pendant une durée de 4 minutes seulement chaque fois.

L'horloge directrice, placée dans le poste télégraphique de la station principale du tronçon, est munie d'un contact-interrupteur double que deux des mobiles de cette directrice, faisant l'un sa révolution en 8 heures, l'autre en $7 \frac{1}{2}$ minutes, interrompent périodiquement ; ce n'est que lorsque les deux interruptions ont lieu simultanément, soit une fois par 8 heures, que le circuit de la ligne sortant de la station principale est effectivement coupé pour le service télégraphique proprement dit. Cette interruption de circuit dure, du fait de la directrice, pendant une minute exactement.

A chacune des sous-stations, l'horloge qu'il s'agit de maintenir à l'heure est elle-même pourvue d'un mécanisme de contact qui entre automatiquement en action et dirige, une fois par 8 heures, pendant 10 secondes (temps de la sous-station), le courant de la pile du poste sur un électro-aimant dont l'armature, ainsi attirée, empêche la fourchette d'échappement à ancre qui, en temps

normal, oscille avec le balancier, de suivre les mouvements de va-et-vient de ce dernier. L'horloge dirigée s'arrête en conséquence pendant quelques secondes dont le nombre dépend de l'avance qu'elle a pu prendre sur la directrice durant les huit heures qui viennent de s'écouler. On voit que le système adopté oblige à régler légèrement sur l'avance le balancier des horloges dirigées par rapport à celui de la directrice.

Au moment où, à la fin de la minute d'interruption opérée par

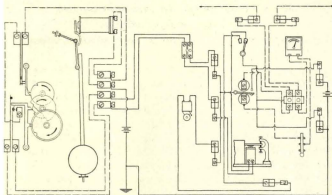


Fig. 312

la directrice, celle-ci rétablit le circuit de ligne, l'électro-aimant de la sous-station, qui retenait la fourchette d'échappement de l'horloge dirigée, la libère, et celle-ci repart à l'heure exacte de la directrice. C'est le relais télégraphique de la sous-station qui ferme le circuit de l'électro-aimant correcteur quand la pendule dirigée a atteint l'heure voulue pour cela, et qui l'ouvre quand le circuit de ligne se rétablit.

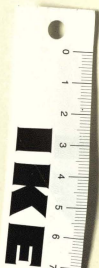
Les horloges primaires et secondaires employées dans l'installation horaire que nous venons de décrire, sont des pendules mécaniques que l'on remonte à la main tous les huit jours ; aucune d'elles n'est pourvue des contacts d'horloge-mère secondaire capables d'actionner des compteurs électrochronométriques. Ce sont de simples « garde-temps ». Il est évident qu'en leur substituant, au moins dans les gares importantes, des horloges-mères secondaires autonomes, du type à palette de Hipp, par exemple, commandant

**Transmission de l'heure exacte
à de grandes distances par les lignes télégraphiques
ou téléphoniques de l'Etat.
Signaux horaires dans les ports et sur les côtes de la mer.**

Il ne suffit pas que l'heure civile, déterminée par un ou plusieurs observatoires, avec toute la précision que comporte l'outillage scientifique moderne, soit mise, au moyen de cadrans publics et privés, à la portée immédiate des populations urbaines ou agricoles dont l'activité, toujours plus intense, doit être réglée au plus près de leurs besoins ; il faut encore que les administrations télégraphiques, postales, ferroviaires, maritimes, etc., qui ont, au plus haut degré, besoin de la connaissance exacte et continue du temps pour régler, elles aussi, le trafic croissant auquel elles ont à faire face, soient mises en mesure de distribuer, au moins une fois par jour, à tous leurs bureaux, un signal horaire officiel permettant aux agents de remettre à l'heure, soit manuellement, soit, lorsque les circonstances s'y prêtent, automatiquement (voir I du chap. précédent), leurs pendules garde-temps et leurs montres.

Nous avons vu, à pages 408 et suivantes, qu'une distribution de cette espèce avait été organisée en Suisse dès 1863 et que l'heure de l'observatoire de Neuchâtel, communiquée chaque jour au Bureau central des télégraphes de Berne au moyen d'une horloge à coïncidences, et recueillie là sur un régulateur garde-temps, était ensuite transmise électriquement à tous les bureaux de télégraphes (et de postes) de la Confédération. Cette dernière opération se faisait en envoyant à une heure convenue d'avance et pendant une durée limitée, une émission de courant relativement longue dont la fin coïncidait exactement avec une seconde prédéterminée et connue du temps moyen officiel rapporté primitivement au méridien de Berne et plus tard (dès 1911) à celui du *fuséau* horaire de l'Europe centrale dont la Suisse fait actuellement partie.

un certain nombre de cadrans secondaires à répartir dans les différents locaux de la sous-station correspondante, on aura donné au système Normal-Zeit avec remise à l'heure, une extension qui le rendra apte à satisfaire à des exigences de plus en plus compliquées, et alors on retombera dans le cas déjà traité aux pages 427 et suivantes.



**Transmission de l'heure exacte
à de grandes distances par les lignes télégraphiques
ou téléphoniques de l'Etat.**

Signaux horaires dans les ports et sur les côtes de la mer.

Il ne suffit pas que l'heure civile, déterminée par un ou plusieurs observatoires, avec toute la précision que comporte l'outillage scientifique moderne, soit mise, au moyen de cadrans publics et privés, à la portée immédiate des populations urbaines ou agricoles dont l'activité, toujours plus intense, doit être réglée au plus près de leurs besoins ; il faut encore que les administrations télégraphiques, postales, ferroviaires, maritimes, etc., qui ont, au plus haut degré, besoin de la connaissance exacte et continue du temps pour régler, elles aussi, le trafic croissant auquel elles ont à faire face, soient mises en mesure de distribuer, au moins une fois par jour, à tous leurs bureaux, un signal horaire officiel permettant aux agents de remettre à l'heure, soit manuellement, soit, lorsque les circonstances s'y prêtent, automatiquement (voir I du chap. précédent), leurs pendules garde-temps et leurs montres.

Nous avons vu, à pages 408 et suivantes, qu'une distribution de cette espèce avait été organisée en Suisse dès 1863 et que l'heure de l'observatoire de Neuchâtel, communiquée chaque jour au Bureau central des télégraphes de Berne au moyen d'une horloge à coïncidences, et recueillie là sur un régulateur garde-temps, était ensuite transmise électriquement à tous les bureaux de télégraphes (et de postes) de la Confédération. Cette dernière opération se faisait en envoyant à une heure convenue d'avance et pendant une durée limitée, une émission de courant relativement longue dont la fin coïncidait exactement avec une seconde prédéterminée et connue du temps moyen officiel rapporté primitivement au méridien de Berne et plus tard (dès 1911) à celui du *fuseau* horaire de l'Europe centrale dont la Suisse fait actuellement partie.

En France, dès 1880, l'observatoire de Paris a longtemps, chaque dimanche, envoyé l'heure par le télégraphe à diverses villes, d'abord à Rouen et au Havre, puis aux autres villes qui le demandèrent et qui furent au nombre total de sept (Rouen, le Havre, la Rochelle, Nancy, St. Nazaire, Chambéry et Cluses). Ce service fut supprimé au 31 décembre 1911 et remplacé par les signaux T. S. F. de la Tour Eiffel.

Aux États-Unis, de 11 h. 55 à 12 h. 0, heure du 75^{me} méridien, l'expédition des dépêches par fils est suspendue pour permettre l'envoi des signaux d'heure. Pour la seule côte Est des États-Unis, il en est ainsi sur plus de 275.000 kilomètres de lignes télégraphiques (voir *Annuaire du Bureau des longitudes* 1914 B. 72).

Aujourd'hui, le système le plus perfectionné de distribution quotidienne de l'heure officielle par les lignes télégraphiques de l'État, est celui de l'Empire allemand, qui a été installé par la société Normal-Zeit (déjà souvent citée au cours du présent ouvrage), avec la coopération de la maison Siemens & Halske.¹

Le centre de détermination quotidienne de l'heure exacte du fuseau horaire de l'Europe centrale (Mittel-europäische Zeit), est l'observatoire de Berlin, tandis que son centre général de distribution automatique aux principaux bureaux télégraphiques de l'Empire, est une pendule spéciale installée dans la gare de Silésie (Schlesischer Bahnhof) à Berlin.

C'est la station centrale urbaine, type Normal-Zeit (p. 419 et suiv.), qui sert d'intermédiaire entre les deux centres que nous venons de nommer. Son horloge-mère, comme l'on sait, d'une part est électriquement synchronisée par une pendule de précision placée à l'observatoire, et d'autre part remet à l'heure les horloges secondaires qui dépendent d'elle. Or, la pendule spéciale de la gare de Silésie est intercalée sur le réseau urbain N. Z. de Berlin, exactement comme une autre quelconque de ces horloges secondaires ; toutefois, au lieu de se mettre, comme celles-là, toutes les quatre heures en état de recevoir l'émission de remise à l'heure de l'horloge-mère urbaine, elle ne s'y met qu'une fois par 24 heures, au moyen d'un contact spécial qu'elle-même ferme automatiquement à 7 heures du matin et qui permet à l'émission correctrice d'entrer en elle et de corriger instantanément l'écart éventuel subi, soit en avance, soit en retard, depuis la veille ; l'écart ainsi corrigeable est au maximum

¹ ZACHARIAS, p. 123 et suiv.

de 29 secondes. Un arrêt éventuel de la pendule distributrice de la gare de Silésie serait dénoncé, sur l'appareil enregistreur de la centrale urbaine N.-Z., par l'absence du point de contrôle correspondant (p. 421).

La pendule distributrice, une fois remise à l'heure exacte de l'observatoire, est elle-même en état de fermer les divers contacts qui mettent en action les appareils envoyant les signaux horaires dans

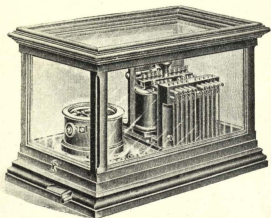


Fig. 313

les lignes télégraphiques de l'Empire. Ces signaux consistent tout d'abord dans l'envoi automatique du signal d'avertissement *mez* (composé des initiales des trois mots allemands *Mittel europäische Zeit*), expédié par un mouvement d'horlogerie spécial analogue à celui d'un récepteur Morse à encre. Ce mouvement est déclenché électro-magnétiquement 120 secondes avant 8 heures, par un contact *ad hoc* de la pendule distributrice, et c'est un disque dont la périphérie est munie de saillies convenablement disposées, qui ferme et ouvre alternativement le contact général actionnant simultanément toutes les lignes télégraphiques qui participent à la distribution des signaux horaires. Le signal horaire proprement dit, celui d'après lequel on remet à l'heure les garde-temps et les montres, est inscrit sur les récepteurs Morse des postes reliés, sous la forme d'un long trait qui commence 50 secondes avant 8 heures, se termine

à 8 heures exactement, et est commandé par un contact spécial de la pendule directrice elle-même.

Enfin, le mouvement d'horlogerie dont il a été parlé ci-dessus est remis une seconde fois en marche par la pendule directrice et

envoie de nouveau, à deux reprises, comme signal final, le mot *mez*.

La liaison entre les appareils de transmission automatique de la gare de Silésie ci-dessus mentionnés, et les têtes de lignes télégraphiques, est faite non pas directement, mais bien par l'intermédiaire de *relais multiples* construits par la maison Siemens & Halske et dont la figure 313 donne l'aspect extérieur. Chacun de ces relais dessert jusqu'à 20 lignes.

Sur la figure 314, qui repré-

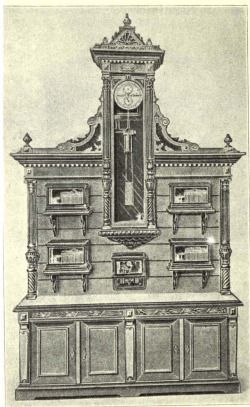


Fig. 314

sente la vue de face de la pendule distributrice de la gare de Silésie, on voit qu'il existe quatre de ces relais multiples donnant la possibilité d'expédier le signal d'heure officielle à $4 \times 20 = 80$ lignes.

Ces 80 lignes ne comprennent, cela va de soi, que les stations té-

légraphiques les plus importantes de l'Empire ; celles-ci réexpédient à leur tour le signal horaire aux stations moins importantes, par des moyens non-automatiques.

La figure 315 donne la vue extérieure de l'appareil, type Morse, qui mis en action par un contact spécial de la pendule distributrice, expédie automatiquement les signaux *mez* avant et après le long trait du signal d'heure proprement dit.

Le cycle complet des opérations d'expédition automatique des divers signaux horaires comporte, non compris la remise à l'heure de la pendule distributrice qui a lieu à 7 heures, une durée de 2 minutes environ, pendant laquelle le trafic télégraphique ordinaire est suspendu. Cette interruption, qui n'a lieu qu'une fois par 24 heures,

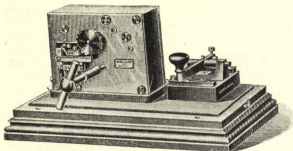


Fig. 315

peut être considérée comme négligeable ; elle est largement compensée par l'avantage énorme que représente une heure exacte et uniforme répartie dans tout l'Empire.

Il résulte de l'exposé ci-dessus que la pendule directrice de la gare de Silésie a dû être pourvue d'un système de contacts relativement compliqué, du fait que les deux genres de signaux horaires expédiés dans les lignes sont commandés, l'un, celui du mot *mez*, par un mouvement d'horlogerie déclenché et arrêté deux fois par cycle, l'autre, celui du signal d'heure proprement dit, par l'horloge distributrice elle-même, avec la coopération de divers appareils électromagnétiques locaux (relais, contacts supplémentaires, etc.).

Or, une simplification considérable du système pourrait être obtenue si, au lieu de charger alternativement le mouvement d'horlogerie et la pendule de l'expédition des signaux horaires, on en chargeait le premier tout seul, la pendule n'ayant plus d'autre fonction que de déclancher une fois seulement, à 7 h. 58 m., ledit mouvement, celui-ci pouvant fort bien être organisé de manière à s'arrêter lui-même automatiquement à la fin du cycle.

Toutefois, cette simplification suppose que pendant deux minutes, la vitesse de déroulement des mobiles du mouvement, et notamment celui sur lequel est calée la roue à saillies produisant *tous* les signaux, soit absolument *constante*. Or, cette constance ne peut évidemment pas être obtenue avec un récepteur Morse tel que celui de la figure 315, dont le régulateur est un simple volant à ailettes mobiles. Par

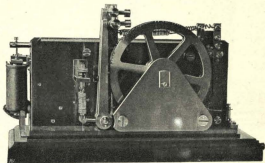


Fig. 316

contre, en employant, à la place de ce dernier, un régulateur à lame vibrante de Hipp (voir plus loin au chapitre IX), on obtient des résultats très satisfaisants.

La figure 316 donne la vue de devant d'un appareil à contacts automatiques de cette espèce qui, dans le catalogue B de la maison Favarger & C^{ie}, est caractérisé comme suit :

« Appareil à mouvement d'horlogerie et à poids, réglé très exactement par une lame vibrante de Hipp et qu'une détente électrique, reliée à une pendule de précision, peut mettre en marche automatiquement, à un instant fixé d'avance. Une fois en marche, l'appareil envoie à distance, dans un nombre quelconque de récepteurs

télégraphiques Morse, des signaux horaires très précis. L'appareil s'arrête automatiquement, une fois la série des signaux terminée. »¹

Signaux horaires téléphoniques. — La grande extension qu'ont prise, durant ces dernières années, les communications téléphoniques urbaines et interurbaines, le fait que dans de nombreux pays les plus petites localités sont reliées au réseau national, ont tout naturellement suggéré l'idée de mettre l'heure exacte à la portée de tous ceux des abonnés du téléphone qui y verraient une utilité et en feraient la demande.

Ici, deux méthodes peuvent être employées : dans la première, qui a de l'analogie avec celle mentionnée à page 393, un abonné quelconque peut demander à toute heure du jour d'être mis en communication téléphonique individuelle avec l'observatoire le plus voisin. L'employé de ce dernier, ayant appris de vive voix que c'est l'heure exacte qu'on lui demande, met, au moyen d'un commutateur *ad hoc*, la ligne de l'abonné appelant en liaison directe avec les bornes d'un microphone spécial installé dans la caisse même de la pendule de temps moyen. Dès ce moment, l'abonné perçoit dans son récepteur téléphonique, les battements à seconde du balancier de cette pendule, dont l'employé de l'observatoire lui fait connaître le rang à chaque instant en en numérotant quelques-uns à la voix.

Dans l'autre méthode, le signal horaire téléphonique n'est envoyé par l'établissement (observatoire ou bureau central horaire) que cela concerne, qu'une fois par jour, à un moment et pendant une durée connus d'avance. Les abonnés du téléphone qui désirent recevoir ce signal régulièrement en informent le bureau central téléphonique et paient une redevance (mensuelle ou annuelle) correspondante.

Voici, à titre d'exemple, le règlement que le Conseil fédéral a mis en vigueur en Suisse le 1^{er} août 1916 :

1^o Le signal radiotélégraphique international de l'heure de l'observatoire de Paris, transmis chaque jour de 10 heures 56 minutes à 11 heures de l'Europe centrale, par la station de la tour Eiffel à Paris, sera, les jours ouvrables, retransmis téléphoniquement par l'administration des télégraphes et des téléphones suisses de Berne.

2^o Tout abonné du téléphone peut s'abonner, auprès de son bureau de téléphone, au signal horaire téléphonique.

¹ Nous avons appris tardivement que l'appareil à lame vibrante ci-dessus mentionné a été installé par la société Normal-Zeit dans la station T. S. F. de Nauen.

3° Les abonnements sont mensuels ou annuels et courent avec l'année ou le mois civils. Les taxes d'abonnement sont de : a) fr. 2,50 par mois ou partie de mois ; b) fr. 20.—, par an pour huit mois au moins ; elles doivent être payées d'avance.

4° Outre la réception par abonnement, sont aussi admises les réceptions isolées sur les réseaux qui reçoivent le signal horaire pour des abonnés du téléphone. Chaque réception isolée comporte un droit de 20 centimes qui est perçu mensuellement avec les taxes de conversations.

5° L'administration des télégraphes et des téléphones n'accepte aucune responsabilité en ce qui concerne le fonctionnement irréprochable du service horaire téléphonique ; néanmoins, elle prend toutes les mesures nécessaires pour assurer et développer ce service.

6° Si une interruption dans la transmission téléphonique du signal horaire dure plus de sept jours consécutifs sans qu'il y ait de la faute de l'abonné, la taxe est remboursée proportionnellement à la durée de l'interruption.

7° Les présentes dispositions déploieront leurs effets à partir du 1^{er} août 1916. Le Département des postes et des chemins de fer pourvoira à leur application. »

Nous constatons, en lisant l'intéressant travail que M. Bigourdan, astronome à l'observatoire de Paris, a publié dans l'*Annuaire du Bureau des longitudes* de 1914, sur « le Jour et ses divisions », que la transmission téléphonique de l'heure a été appliquée avec succès pour déterminer très exactement, en employant la méthode des coïncidences, la différence de longitude entre Paris et Brest.

En 1909, l'observatoire de Hambourg a établi un système de signal horaire téléphonique, visant moins à la précision, mais plus commode, car il suffit de demander la communication avec un numéro connu pour recevoir l'heure exacte.

Enfin, il est opportun de mentionner ici le fait que l'observatoire de Neuchâtel a complété, il y a une vingtaine d'années, le système télégraphique de transmission d'heure qui a été décrit à pages 410 et suivantes, par un système téléphonique qui a permis de mettre sans grands frais, l'heure exacte à la portée de tous les abonnés du téléphone.

Signaux horaires destinés aux navires. — Chacun sait que tout navire possède à son bord un ou plusieurs instruments appelés « chronomètres de marine ». Ce sont des horloges mécaniques d'une grande précision de marche ; leur régulateur est un balancier à

axe vertical et à ressort spiral. La perfection de construction et d'exécution de tous les organes composant une montre marine digne de ce nom (roues dentées et pignons, pivots et coussinets empierrés, balancier et spiral, suspension, etc.), est telle que l'écart de marche diurne de cette machine horaire est réduit à une petite fraction de seconde ; cette marche n'est pas loin d'égaler, théoriquement tout au moins, celle des meilleures pendules fixes à balanciers pendulaires en usage dans les observatoires astronomiques.

Le rôle du chronomètre de marine sur un vaisseau est celui d'un « garde-temps ». Il conserve, sur le support mobile qui le transporte, l'heure du méridien du lieu de départ et permet de calculer à chaque instant la quantité, en arc de longitude, dont le navire s'est déplacé vers l'Est ou vers l'Ouest. Il facilite ainsi la détermination de ce qu'on appelle *le point*, c'est-à-dire l'endroit de la surface du globe terrestre où se trouve le vaisseau à tel ou tel moment donné.

Si la *marche* du chronomètre de marine, autrement dit la quantité, exacte à une très petite fraction de seconde près, dont il avance ou retarde par jour, était parfaitement *constante*, le problème du point en serait très simplifié. Malheureusement cette constance de marche n'existe pour ainsi dire jamais, compromise qu'elle est par toutes sortes de modifications plus ou moins intenses ou plus ou moins rapides que subissent continuellement les métaux composant le mécanisme du chronomètre. Il y a donc une nécessité absolue à ce que les officiers du bord que cela concerne (officiers des montres), puissent contrôler le plus souvent possible la marche de leurs montres marines. Ce contrôle se fait en comparant, à un moment donné, *l'état* de ces montres avec celui d'une machine horaire quelconque dont les conditions *d'état* soient elles-mêmes parfaitement connues. Actuellement, ces comparaisons peuvent se faire très commodément, au moins une fois par jour, en recevant, sur des récepteurs appropriés, les signaux horaires d'une station T. S. F. connue (celle de la tour Eiffel, par exemple), dont les ondes peuvent être perçues dans un rayon de plusieurs milliers de kilomètres autour du centre d'émission.

Avant les récents progrès accomplis en T. S. F., on mettait l'heure exacte à la portée des navigateurs, soit dans les ports, soit sur certains points côtiers, au moyen d'appareils spéciaux, visibles à grandes distances et consistant le plus souvent en un *ballon* de grand diamètre tombant brusquement d'une hauteur d'environ 3 mètres, à midi juste du temps moyen du fuseau horaire intéressé, ou aussi

en un *cadre rectangulaire* de grandes dimensions muni de palettes horizontales qui, en pivotant d'un quart de tour sur leurs axes, offrent à l'œil une surface tantôt opaque, tantôt translucide, dont les alternances de positions, également perceptibles à de grandes distances, permettent de fournir des signaux horaires très exacts précédés et suivis de signaux d'avertissement et de clôture.

La figure 317 donne l'aspect extérieur d'un signal horaire à ballon tombant tel qu'il a été installé il y a quelques années dans le port de Brême (Bremerhafen).

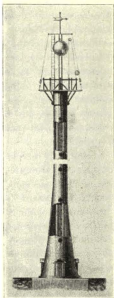


Fig. 317

Sur un massif de béton servant de fondation s'élève, à 24 m. de hauteur, une colonne creuse constituée par un assemblage de solides pièces en fer forgé. On accède à la plate-forme supérieure qui termine cette colonne, en gravissant une échelle de fer placée à l'intérieur. Au-dessus du centre de la plate-forme se dressent trois forts montants qui, passant à travers le ballon B, lui servent de guides dans sa chute et pendant son ascension. Ce ballon consiste en une armature de forme sphérique de 1^m5 de diamètre, recouverte de toile à voile, et pèse 70 kg. Il est retenu croché dans sa position supérieure au moyen d'une boucle de suspension et d'un système de leviers de déclenchement électro-magnétique facile à imaginer. A midi juste, temps de l'Europe centrale, une pendule installée à Bremerhafen (qui a été au préalable remise à l'heure exacte par une

pendule directrice de l'observatoire de Berlin mise momentanément en communication électrique avec elle par une des lignes télégraphiques de l'Empire), lance une émission de courant dans l'électro-aimant déclencheur du ballon. Celui-ci tombe aussitôt en parcourant rapidement une hauteur verticale de 3 mètres. Il va de soi que toutes les précautions ont été prises pour que le choc au point d'arrivée soit aussi doux que possible et ne puisse en aucun cas détériorer l'un ou l'autre des organes du système. L'arrivée à fin de course du ballon est signalée à la station transmettrice de Bremer-

hafen par une émission de réponse produite automatiquement au moyen d'un contact spécial que ferme le ballon lui-même dans sa position inférieure. Cette émission de contrôle met en action, au poste de Bremerhafen, l'armature d'un électro-aimant qui marque un point sur une surface d'enregistrement animée d'un mouvement régulier de translation. Ce poste est ainsi avisé immédiatement et sans avoir besoin de surveiller lui-même optiquement le ballon, que celui-ci a effectué en temps utile sa fonction de signal horaire.

Tous les navires desquels la chute du ballon est visible profitent de ce signal de midi pour faire la comparaison de leurs chronomètres. Le ballon est ensuite recroché, à la main ou par moteur électrique, dans sa position supérieure. Il est ainsi tout prêt à donner automatiquement le prochain signal horaire.

Une même station transmettrice telle que celle de Bremerhafen peut déclancher simultanément les ballons d'un certain nombre de signaux à colonnes semblables à celui de la figure 317 et répartis sur les divers points côtiers qui se prêtent le mieux à leur érection. On a ainsi la possibilité de mettre le signal horaire de midi à la portée de très nombreux navires, même de ceux naviguant en haute mer.

Aux États-Unis d'Amérique, la Western Union Company, puissante société de télégraphie, a fait installer, il y a longtemps déjà, sur le bâtiment de sa station centrale de New-York, un signal horaire analogue à celui que nous venons de décrire, et qui fait connaître chaque jour l'heure exacte de midi à toute la ville et surtout à tous les navires du port. Cette heure est déterminée à l'observatoire de Washington qui la transmet, aux moments voulus, par les lignes télégraphiques de la compagnie, à la station-horaire de New-York et par celle-ci, non seulement aux postes sémaphoriques à ballon tombant qui dépendent d'elle, mais encore à des abonnés qui, dispersés dans de nombreuses localités rapprochées ou éloignées, ont intérêt à recevoir l'heure exacte. La transmission de celle-ci se fait en mettant ces abonnés en état d'entendre les battements de l'échappement d'une forte pendule centrale qui est installée dans un bureau spécial de la compagnie, aménagé pour cela. Le rang de chaque battement est facilement repéré : 1^o par la seconde 0 de chaque minute, qui est muette ; 2^o par un silence de 20 secondes qui marque la fin de chaque série de 5 minutes et enfin 3^o par de légers coups de timbre qui se produisent de quarts d'heure en quarts d'heure et qui en outre sonnent les heures pleines.

Signal horaire marin à jalousie. — Le signal à ballon tombant représenté dans notre figure 317 a l'inconvénient d'exiger, de la part de celui qui l'observe à distance, une très grande attention visuelle ; il s'agit en effet pour lui, de ne pas *manquer* l'instant vite écoulé marqué par la chute du ballon.

Pour éviter cet inconvénient, MM. Hanusse, ingénieur hydro-

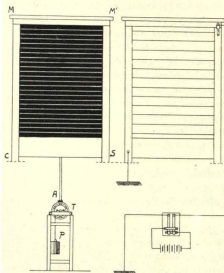


Fig. 318

graphe, et C. Borrel, constructeur, tous deux à Paris, ont imaginé le signal à cadre rectangulaire et à jalousie dont nous avons déjà dit quelques mots à page 476, qui a figuré à l'Exposition universelle de 1900 (voir *Comptes rendus du Congrès international de Chronométrie* de cette époque) et dont la figure 318 représente schématiquement la disposition.

« Cet appareil se compose de 4 parties principales qui sont :

- 1° L'ossature métallique servant de cadre et de bâti-support ;
- 2° La partie optique servant à la production des signaux ;
- 3° La partie mécanique actionnant les organes mobiles ;
- 4° La partie électromagnétique provoquant les signaux suivant des périodes déterminées et variables à volonté.

» 1° *Ossature.* — Un caisson métallique étanche $MM'S$ peut être exposé, suivant les applications, soit à découvert au-dessus d'un édicule *ad hoc*, soit dans l'embrasure d'une baie pour signaux lumineux nocturnes. Le montant M sert de logement aux organes électromagnétiques ; le montant M' reçoit les organes mécaniques dont l'origine peut être disposée en un point quelconque du soubassement S .

» 2^o *Partie optique.* — Elle est composée essentiellement d'un certain nombre de lames planes de faible épaisseur pouvant tourner chacune autour d'un axe horizontal accomplissant sa révolution en quatre périodes égales de 90 degrés d'arc chacune. La position de ces lames est réglée de telle façon qu'elles se présentent alternativement de face ou de tranche. Pour la première de ces positions, le signal a l'apparence d'un écran peint en noir (ou autre couleur) masquant le vide du cadre (fig. de gauche, signal fermé). Pour la seconde, le cadre paraît vide (fig. de droite, signal ouvert). Les changements de position s'effectuent en un quinzième de seconde, condition réalisant la visibilité parfaite de signaux se succédant de seconde en seconde.

» 3^o *Partie mécanique.* — Les axes sur lesquels sont fixées les lames pivotent dans des paliers de bronze fixés aux montants *M* et *M'*. Dans le montant *M'*, les extrémités de ces axes sont munies de roues coniques engrenant avec un pignon fixé sur un arbre vertical de commande dont le prolongement serait en *A*. On aboutit ainsi au treuil *T* comportant également un engrenage conique actionné par le poids moteur *P*. Une disposition appropriée de cette transmission mécanique permet à chaque lame une fonction *amortie*, afin d'éviter l'emploi d'un poids trop lourd dont l'effet brusque pourrait détériorer les organes. La hauteur de chute du poids peut être quelconque selon que le câble de suspension est plus ou moins mouflé.

» 4^o *Partie électromagnétique.* — Elle se décompose en deux mécanismes correspondant chacun à l'une des positions des lames ; autrement dit, l'un d'eux commande exclusivement la position verticale des lames et l'autre exclusivement leur position horizontale. Chacun d'eux est pourvu d'un électro-aimant à armature polarisée intercalé en tension avec son collègue ; le petit schéma avec clef d'inversion à main dessiné au-dessous de la figure de droite explique clairement le fonctionnement du tout ; la terre sert de chemin de retour aux émissions de courant. Cette clef d'inversion peut aussi être actionnée à distance par une pendule astronomique pendant des périodes déterminées. »

Les inventeurs du signal à jalousie dont nous nous occupons, font remarquer que quelques évolutions rapides des lames provoquées soit à la main, soit automatiquement (par une pendule), quelques minutes avant l'heure fixée pour le signal horaire, avertiraient utilement les observateurs de l'approche de ce dernier. Le premier

signal horaire proprement dit pourra être fait, par exemple, à la soixantième seconde de l'heure convenue, puis être continué de seconde en seconde jusqu'à la dixième. Ensuite une interruption pourra avoir lieu jusqu'à la vingtième seconde, à partir de laquelle le signal sera repris jusqu'à la trentième, interrompu de nouveau jusqu'à la quarantième et ainsi de suite pendant toute une minute au cours de laquelle trente-trois signaux donnés en trois reprises auront permis de faire de bonnes comparaisons chronométriques. Toute autre succession des signaux peut d'ailleurs être adoptée.

A la suite d'expériences nombreuses faites entre le dépôt de la Marine à Paris et les tours de Notre-Dame, le retard dû à la transmission a été trouvé de 0,25. Ce retard est constant, c'est-à-dire sensiblement indépendant de l'intensité du courant employé. L'erreur moyenne des observations isolées a été de 0,06.

Quoique construit spécialement pour donner des signaux horaires, cet appareil peut être employé pour la télégraphie optique diurne et nocturne.

Renseignements pratiques concernant un réseau public d'horloges électriques.

Généralités. — Le lecteur ne sera pas surpris de constater, en parcourant le présent chapitre VIII, que l'auteur a traité celui-ci en admettant que par *réseau public* on entend surtout une installation d'heure unifiée dans laquelle les horloges secondaires électriques exposées aux regards du public sont, en très grande majorité, ou même le plus souvent exclusivement, du type compteur électrochronométrique à armature polarisée. Nous avons en effet maintes fois expliqué et répété, au cours du présent ouvrage, que seul ou presque seul ce type est en état de satisfaire pleinement aux conditions, souvent très dures, auxquelles sont soumis les cadrans de rues, de places publiques, de quais de gares, etc., et de tous autres endroits où règnent les intempéries de l'*air extérieur*. Nous avons montré que toute horloge secondaire (de petit ou moyen diamètre de cadran), pourvue d'un échappement mécanique (à ancre ou à chevilles, à pendule ou à balancier de montre) et d'un dispositif de remise à l'heure agissant rarement ou fréquemment (synchronisation ou remise à l'heure proprement dite), était, du fait même de la présence de cet échappement, hors d'état de supporter sans perturbation ces intempéries, et que, si une exception à cette dernière règle peut être mentionnée, c'est au seul profit des grandes horloges monumentales ou de clocher, dans lesquelles il est possible et nécessaire de donner aux organes de l'échappement mécanique et à la réserve de force motrice qui les commande, une importance telle que tous les frottements variables, même les plus grands, résultant de ces intempéries, soient vaincus. Enfin nous avons insisté sur le fait d'expérience que les compteurs électrochronométriques, même à armatures polarisées, qui nécessitent la présence d'un ressort antagoniste, ou d'un ressort accumulateur de force vive à insérer entre une armature à course faible ou instan-

tanée et les aiguilles plus ou moins massives du compteur, ne peuvent pas donner des résultats satisfaisants lorsqu'on veut les employer à la commande de cadrans publics dépassant 40 ou 50 centimètres de diamètre.

Le seul système d'horloge secondaire électrique qui pourrait, à la rigueur, entrer en concurrence avec celui des compteurs électro-chronométriques à armatures polarisées et à marche saccadée, serait celui, à marche continue, de M. Thury (p. 215) qui présenterait même, sur le précédent, quelques avantages. Malheureusement, le système Thury étant à courant polyphasé exige au moins 3 fils (ou dans le cas le plus favorable, deux fils et la terre), pour relier l'horlogemère aux horloges secondaires, et ce seul fait le rend impropre à la distribution économique de l'heure civile.

Etudes préliminaires.

Lorsqu'il s'agit de doter une ville d'un réseau d'horloges électriques unifiées, la municipalité de cette ville, ou la société privée qui entreprend l'installation et l'exploitation du réseau, fait étudier un avant-projet, avec devis à l'appui, donnant une idée des frais de premier établissement, ainsi que des dépenses et recettes annuelles.

Pour établir cet avant-projet, il est utile de posséder ou de rassembler les données et pièces suivantes :

1° Un plan de la ville sur lequel sont marqués :

- a) L'emplacement de la station centrale urbaine de distribution de l'heure ;
- b) les emplacements numérotés des horloges secondaires publiques et d'abonnés ;
- c) l'emplacement de l'observatoire astronomique chargé de fournir l'heure exacte ;

2° Une liste des horloges secondaires reproduisant les numéros correspondants du plan et donnant en outre la désignation de chaque horloge. Cette désignation sera assez détaillée pour que le fabricant chargé de livrer les cadrans secondaires et leurs mécanismes, puisse voir immédiatement :

- a) Quel sera le diamètre du ou des cadrans de chaque horloge secondaire ;
- b) si celle-ci sera à simple ou à multiple face ;

- c) si elle sera placée à l'extérieur ou à l'intérieur d'une maison ;
- d) si elle devra être éclairée la nuit et comment (par transparence ou par réflexion, au gaz ou à l'électricité, etc.) ; l'électricité par incandescence est, cela va de soi, presque toujours préférée ;
- e) quel sera son mode de fixation (en applique contre une paroi verticale, ou suspendue au plafond, ou placée debout sur une colonne, ou noyée dans l'épaisseur d'une paroi, d'un mur de fronton, etc.).

Si la ville en cause possède déjà ou désire installer de grandes horloges de clocher qui devront être maintenues à l'heure au moyen du courant électrique fourni par la station centrale horaire, il faudra, pour chacune d'elles, étudier une détente électrique appropriée (p. 336) ou un dispositif de remise à l'heure (p. 339).

Le technicien que cela concerne, muni des données ci-dessus, trace, sur le plan de la ville, le réseau des fils destinés à relier la station centrale avec les horloges secondaires. Il doit, pour cela, fixer avant tout le nombre de groupes que comportera ce réseau, en tenant compte du nombre des horloges secondaires déjà marquées au plan et de l'extension qu'est susceptible de prendre l'installation dans l'avenir.

Ainsi, par exemple, si 500 horloges sont marquées sur le plan, au début, et si l'on désire prévoir l'extension du réseau jusqu'à 1000 horloges, on adoptera une horloge-mère à déclenchement de Hipp (p. 360) capable de desservir 20 groupes, chacun de ceux-ci étant destiné à recevoir au total 50 horloges. Les 500 horloges du plan sont alors réparties entre 15 des 20 groupes prévus, ce qui charge leurs interrupteurs à raison de $\frac{500}{15} = 33$ horloges en moyenne.

Il reste alors une réserve de $50 - 33 = 17$ horloges par groupe pour les 15 interrupteurs déjà en fonction, et de $5 \times 50 = 250$ horloges pour les 5 interrupteurs non encore utilisés, ce qui représente une réserve totale de $250 + (15 \times 17) = 505$ horloges.

Cela admis, et la station centrale étant supposée placée à peu près au centre de la ville, le tracé de chacun des 15 fils (ou doubles fils) de groupes est marqué sur le plan, de façon à passer aussi près que possible des horloges qu'il est destiné à alimenter et auxquels des fils d'embranchement le relieront. Pour fixer ce tracé, on tient aussi compte des rues qui se prêtent le mieux à l'installation des fils aériens ou souterrains et des quartiers ou portions de quartiers

qui, selon les prévisions, fourniront à l'avenir le plus d'horloges nouvelles.

D'une manière générale, le réseau prend peu à peu, et au fur et à mesure de son développement, l'aspect d'une toile d'araignée dont la station urbaine est le centre, les lignes principales de groupes, les fils radiaux, et les lignes d'embranchements, les fils transversaux. Lorsque la répartition des horloges secondaires est régulière ou à peu près sur toute la surface de terrain occupée par la ville, les lignes de groupes partent de la station centrale dans toutes les directions de la rose des vents.

Le plan du réseau, effectué comme nous venons de l'indiquer, permet de calculer, en kilomètres de fils simples (ou doubles), le développement total des lignes et par conséquent de noter au devis la dépense d'installation correspondante.

Lorsque chacun des électro-aimants des horloges secondaires a une résistance supérieure à 150 ohms au moins, on peut adopter, pour tous les points du réseau, un fil de même section ; cela simplifie les travaux de pose des lignes et permet notamment de brancher à l'avenir un nombre quelconque d'horloges sur n'importe quelle ligne principale ou d'embranchement, ce qui ne pourrait pas se faire si cette ligne avait reçu une section plus petite en rapport avec le nombre restreint d'horloges qu'elle devait alimenter au début. Le type de fil ainsi adopté pour tout le réseau doit en outre avoir, par rapport à celle des récepteurs, une résistance assez faible pour rendre superflu l'emploi de résistances compensatrices ou d'équilibre (p. 278 et suiv.).

L'expérience a démontré qu'avec une résistance uniforme de 150 ohms par électro-aimant de réceptrice, la résistance, également uniforme, par kilomètre de fil simple, ne devait pas dépasser 5 ohms, ce qui correspond à un fil de bronze siliceux ou chromé à haute conductibilité de 2 mm. de diamètre environ. Ce diamètre peut être conservé lorsque, au fur et à mesure du développement du réseau, on trouve intérêt à travailler à plus haut voltage et à porter à 500 et même 1000 ohms, la résistance d'enroulement de chaque réceptrice nouvelle.

Calcul du voltage et de la capacité du générateur de courant.

— Le *voltage* de la source de courant capable d'alimenter les 500 horloges secondaires marquées sur le plan, se détermine en raisonnant comme suit : soient 35 le nombre des horloges du groupe le plus chargé, 150 ohms la résistance r_1 de chaque électro-aimant de

réceptrice, 0,025 ampère l'intensité i_1 du courant que doit recevoir normalement chaque horloge pour fonctionner avec la sécurité voulue, et enfin 5 ohms la résistance kilométrique du fil conducteur adopté pour les lignes et leurs embranchements.

Supposons, pour simplifier le calcul et aussi pour tenir compte du cas le plus défavorable qui puisse se présenter dans la pratique, que les 35 horloges sont toutes groupées, à peu de distance les unes des autres, à l'extrémité de la ligne principale de groupe et que celle-ci ait une longueur de 3 kilomètres; on aura d'après la loi d'Ohm :

Volts nécessaires aux bornes d'une réceptrice :

$$e_1 = r_1 \times i_1 = 150 \times 0,025 = 3,75 \text{ volts.}$$

L'intensité totale I_t du courant alimentant les 35 horloges du groupe, intercalées en dérivation, sera :

$$I_t = 0,025 \times 35 = 0,875 \text{ ampère.}$$

La résistance R_1 du fil de 3 kilomètres sera, pour une ligne à simple fil avec retour par la terre :

$$R_1 = 3 \text{ klm.} \times 5 \text{ ohms} = 15 \text{ ohms,}$$

et celle des 35 horloges en dérivation (voir page 33) :

$$R_{35} = \frac{150}{35} = 4,28 \text{ ohms;}$$

en sorte que la résistance totale de la ligne et des horloges sera :

$$R_t = R_1 + R_{35} = 15 + 4,28 = 19,28 \text{ ohms,}$$

ce qui donne comme nombre de volts nécessaires aux bornes du générateur de courant

$$V_t = I_t \times R_t = 0,875 \times 19,28 = 16,87 \text{ volts,}$$

représentant, en chiffre rond et à raison de 2 volts par élément, une batterie de 8 à 9 accumulateurs en série dont la résistance intérieure, très petite, pourra être négligée.

En admettant que la durée du contact de chacun des 15 interrupteurs de groupes en fonction au début, soit de 0,8 seconde (p. 289), on aura comme dépense de courant :

par circuit de groupe et par minute : $0,875 \times 0,8 = 0,70$ coulomb,
par circuit de groupe et par jour : $0,70 \times 1440 = 1008$ coulombs,
et enfin pour 15 circuits de groupes et par jour :

$$1008 \times 15 = 15\,120 \text{ coulombs.}$$

Or 15 120 coulombs équivalent à $\frac{15\,120}{3\,600} = 4,2$ ampères-heures.

4,2 ampères-heures représentent ainsi la quantité de courant qu'aura débitée en un jour la batterie d'accumulateurs pour actionner les horloges marquées au plan (régime de début).

Si donc on veut que la batterie puisse fonctionner 15 jours par exemple sans être rechargée, il faudra lui donner une *capacité* de

$$15 \times 4,2 = 63,00 \text{ ampères-heures}$$

chiffre qu'il sera prudent d'arrondir considérablement pour tenir compte des bobines non-inductives intercalées en dérivation à l'origine de chaque ligne de groupe et de l'extension progressive du réseau jusqu'à concurrence de 50 horloges secondaires par groupe.

Si, au lieu de travailler à raison de 3,75 volts (mesurés aux bornes de chaque réceptrice), on adopte le régime mentionné à la page 351, avec des groupes chargés au début et en moyenne de 70 horloges par groupe, on aura :

$$r_1 = 1\,000 \text{ ohms}, i_1 = 0,01 \text{ amp. et } e_1 = 10 \text{ volts.}$$

Puis :

$$I_t = 70 \times 0,01 = 0,7 \text{ amp.,}$$

$$R_1 = 3 \times 5 = 15 \text{ ohms,}$$

$$R_{70} = \frac{1\,000}{70} = 14,3 \text{ ohms.}$$

La résistance totale de la ligne de 3 kilomètres de longueur, y compris les 70 horloges elles-mêmes, sera :

$$R_t = R_1 + R_{70} = 29,3 \text{ ohms,}$$

$$\text{d'où } V_t = I_t \times R_t = 0,70 \times 29,3 = 20,51 \text{ volts,}$$

que fournira une batterie d'accumulateurs de 10 à 11 éléments en tension.

Voyons quelles seront, dans le cas où l'on aurait 13 interrupteurs de groupes, chargés, au début, à raison de 70 horloges secondaires par groupe, les quantités de courant mises en mouvement ; on aura tout d'abord :

$$70 \times 13 = 910 \text{ horloges}$$

avec une réserve d'avenir de

$$(13 \times 30) + (7 \times 100) = 1090 \text{ horloges,}$$

s'il y a en tout 20 interrupteurs de groupes pouvant être chargés

chacun à raison de 100 horloges ; à pleine charge de l'horloge-mère il y aura donc :

$$20 \times 100 = 2000 \text{ horloges secondaires de tous diamètres.}$$

Les 70 horloges que chaque interrupteur desservira au début, occasionneront une dépense de courant de :

par circuit avec un contact de 0,8 sec. : $70 \times 0,01 \times 0,8 = 0,56$ coulomb,

par circuit et par jour : $0,56 \times 1440 = 806,4$ coulombs,

pour 13 circuits et par jour : $806,4 \times 13 = 10483,2$ coulombs,

soit $\frac{10\,483,2}{3\,600} = 2,9$ ampères-heures.

Par an, la dépense en ampères-heures sera de :

$$365 \times 2,9 = 1058,5$$

L'énergie correspondante livrée en une année par notre batterie de 20,5 volts sera, en vertu de la formule

$$T \text{ joules} = Q \text{ coulombs} \times E \text{ volts} :$$

$$T = 1058,5 \times 3\,600 \times 20,51 = 78\,155\,406 \text{ joules}$$

soit $\frac{78\,155\,406}{3\,600 \times 1\,000} = 21,7$ kilowatt-heures.

Avec le réseau en pleine charge de ses 2000 horloges secondaires et dans le cas du régime de 1000 ohms par électro-aimant de réceptrice en dérivation, on aurait, en conservant R_1 égal à $3 \times 5 = 15$ ohms :

$$R_t = R_1 + R_{100} = 15 + \frac{1\,000}{100} = 15 + 10 = 25 \text{ ohms,}$$

et par suite $V_t = I_t \times R_t = 100 \times 0,01 \times 25 = 25 \text{ volts}$

que fournira une batterie d'accumulateurs de 12 à 13 éléments en tension.

Ici encore les quantités de courant mises en jeu à la fin d'une année se calculent comme suit :

par circuit de 100 horloges et par minute : $100 \times 0,01 \times 0,8 = 0,8$ coulomb,

par circuit de 100 horloges et par jour : $0,8 \times 1440 = 1\,152,0$ coulombs,

pour 20 circuits et par jour : $1152 \times 20 = 23\,040$ coulombs,

pour 20 circuits et par an : $23\,040 \times 365 = 8\,409\,600$ coulombs.

L'énergie correspondante absorbée par le réseau de 2000 horloges. et livrée par la batterie de 25 volts en une année sera :

$$8\,409\,600 \text{ coulombs} \times 25 \text{ volts} = 210\,240\,000 \text{ joules}$$

$$\text{soit } \frac{210\,240\,000}{3\,600\,000} = 58,4 \text{ kilowatt-heures.}$$

En admettant que le rapport de rendement de la batterie d'accumulateurs soit de 70 %, l'énergie absorbée pendant les charges sera, en une année, de :

$$\frac{58,4}{0,70} = 83,43 \text{ kilowatt-heures.}$$

On constate ainsi que si le courant urbain disponible pour la charge de notre batterie d'accumulateurs de 25 volts est continu, les frais de charge ne seront que de quelques francs par an. Si, par exemple, le kilowatt-heure de courant urbain coûte, à la sortie du compteur d'électricité, 50 cent. en moyenne (ce qui est un tarif de vente de la force électrique plutôt élevé), on aura, comme dépense annuelle en courant de charge :

$$83,43 \times 0,50 = \text{fr. } 41,71.$$

Autant dire que ces frais, en regard du nombre des horloges alimentées (2000), sont négligeables.

Quant à la *puissance* de la batterie, elle se calcule d'après la formule $P = EI$ (p. 25), et comme ici $E = 25$ volts et $I = 100 \times 0,01 = 1$ ampère dans chaque groupe, on a :

$$P = EI = 25 \times 1 = 25 \text{ watts ou joules-secondes,}$$

et comme d'autre part 1 joule-seconde est égal à 0,102 kilogrammètre-seconde (p. 43), et un cheval à 75 kilogrammètres-secondes, la puissance de la batterie des accumulateurs pourra être exprimée par

$$P = 25 \times 0,102 = 2,55 \text{ klgm.-sec.} = \text{un trentième de cheval environ}^1.$$

Nota. — Si nous nous reportons au calcul de la page 485 où, pour 35 horloges de 150 ohms, la source de courant doit avoir un voltage de 16,87 volts, ce qui correspond à une puissance de

$$35 \times 0,025 \text{ amp.} \times 16,87 \text{ volts} = 14,76 \text{ watts,}$$

¹ Il résulte de là qu'un cheval de 75 klgm.-sec. pourrait alimenter $2000 \times 30 = 60.000$ horloges secondaires de tous diamètres. Il est intéressant de rapprocher ce chiffre de celui auquel on arrive en faisant un calcul analogue dans le cas de la distribution de l'heure unifiée par air comprimé.

on constate que le rapport des puissances sous les deux régimes de 1000 ohms et de 150 ohms est de

$$\frac{25}{14,76} = 1,69 \text{ watt}$$

alors que le rapport des deux nombres d'horloges correspondants par groupe est de :

$$\frac{100}{35} = 2,8.$$

On peut donc alimenter, sous le régime de 1000 ohms, un nombre d'horloges supérieur d'environ 60 % à celui qui est admissible sous le régime de 150 ohms. Ce gain est dû à une meilleure utilisation de l'enroulement des électro-aimants des réceptrices (ampères-tours augmentés dans une plus forte proportion que la résistance). Il y a là une augmentation de rendement analogue à celle qui s'est produite lorsque, dans le domaine de l'éclairage, on a pu substituer aux lampes à filament de charbon, qui absorbaient 3 à 4 watts par bougie, des lampes à filament métallique n'exigeant plus que 0,5 watt par bougie.

Dans les exemples qui précèdent, nous avons admis que le retour du courant se fait par la terre. Il va de soi que les conditions de résistance des lignes et de voltage de la source de courant se modifient, lorsque ce retour a lieu par un second fil principal de groupe semblable au premier ; la marche du calcul est alors en principe la même que celle que nous venons d'indiquer. Nous rappelons, à cette occasion, que dans les installations modernes de distribution d'heure unifiée, on adopte de préférence le système des « lacets » (lignes à double fil), afin d'éviter totalement les inconvénients parfois gênants qui résultent de tramways électriques voisins employant leurs rails comme conducteurs du courant de traction.

Horloges secondaires. — Nous n'avons pas à nous occuper ici de la partie du devis d'installation qui concerne les horloges secondaires, car elle dépend au plus haut degré des diamètres de cadrans prescrits ou adoptés et de leurs divers modes de fixation. Ce sont les catalogues illustrés et les listes de prix des fabricants de ces horloges qui fourniront sur ce point les renseignements voulus. Les figures de la planche VI donnent une idée des divers aspects que peuvent présenter extérieurement quelques horloges à compteurs électrochronométriques.

Appareils de la station centrale horaire. — L'énumération de ces appareils a déjà été faite dans divers paragraphes du chapitre VI. Ils diffèrent considérablement selon le système d'unification d'heure adopté. Encore ici, ce sont les catalogues du fabricant spécialiste chargé de les livrer, qui fourniront les renseignements nécessaires.

Réseau des fils. — Nous avons déjà donné les indications voulues quant au choix de l'espèce et du diamètre uniforme de ces fils (en tant qu'extérieurs tout au moins) et quant à leur fractionnement en plusieurs secteurs de groupes. Dans le présent chapitre qui est surtout d'ordre pratique, il paraîtrait indiqué de donner quelques détails sur les meilleures méthodes à employer pour poser les fils extérieurs et intérieurs et sur les précautions à prendre pour assurer, d'une manière durable, leur parfaite conductibilité et isolation et aussi, le cas échéant, leur intime communication avec la terre à la sortie des réceptrices. C'est bien là ce que nous avons essayé de faire dans le chapitre VIII des éditions précédentes du présent ouvrage. Mais ici nous y renonçons, parce que nous estimons préférable de renvoyer le lecteur aux livres spéciaux qui traitent de la meilleure manière d'établir n'importe quel réseau de fils destiné à transporter, sous forme de courant, soit la lumière, soit la force, soit la pensée (écrite ou parlée), soit l'heure exacte, etc.¹ Il est bien évident que quel que soit le but poursuivi au moyen de ce transport, les fils et les appareils qui les protègent (parafoudres, coupe-circuits automatiques, etc.) doivent satisfaire à peu de chose près aux mêmes conditions de bon fonctionnement. Il est d'ailleurs temps de dissiper le préjugé, encore trop répandu parmi les installateurs de lignes, que le bon fonctionnement des appareils transmetteurs et récepteurs des courants dits *faibles* est compatible avec des lignes moins soigneusement établies (toutes proportions de voltage réservées) que celles qui sont destinées à transporter les courants appelés *forts*. C'est bien plutôt le contraire qui serait vrai.

Contrôle et mise en marche du réseau.

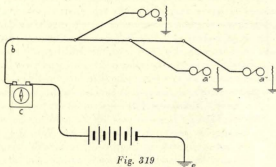
Avant de mettre en marche, après terminaison des travaux d'installation, un réseau public de compteurs électrochronométriques intercalés en dérivation avec retour du courant par la terre, il faut

¹ Nous signalons en particulier les *Grandes encyclopédies industrielles* de la maison d'édition J. B. Baillière à Paris, qui dans plusieurs des volumes ayant déjà paru ou en cours de rédaction (appareillage électrique, canalisations aériennes et souterraines, etc.), pourront être consultés avec profit par les intéressés.

s'assurer du bon état de conductibilité et d'isolation de tous les circuits et voir notamment si chaque horloge secondaire recevra bien l'intensité de courant dont elle a besoin pour fonctionner normalement.

On procède à la vérification de l'état d'isolation des lignes de la manière suivante :

Dans chaque circuit de groupe, tous les fils sortant des électro-aimants des réceptrices pour aller en terre sont éloignés de leurs bornes de sortie a , a' , a'' , etc. (fig. 319). Près de l'horloge-mère, l'ex-



trémité b du fil de groupe est également détachée de son serre-fil et reliée provisoirement, à travers un galvanomètre très sensible c (à 1000 tours, par exemple), à l'un des pôles généraux de la source de courant destinée à alimenter le réseau, l'autre pôle étant mis à la terre en e .

Si l'isolation est parfaite, l'aiguille du galvanomètre restera immobile ; sinon elle sera déviée avec d'autant plus de force que le défaut d'isolation sera plus grand. En réalité les supports des fils sont tous des causes de pertes à la terre, mais de pertes très faibles qui, en pratique, sont négligeables et ne se manifestent sur le galvanomètre c que s'il est très sensible et cela par une déviation très petite de l'aiguille. Une perte de courant assez forte pour ne pouvoir être attribuée aux supports des fils du circuit, devra, cela va de soi, être localisée et écartée.¹

¹ Il est bon de se faire une idée exacte de l'influence que peut avoir une telle perte sur le fonctionnement du groupe. Si cette perte a pour effet de distraire du fil une intensité de courant égale, par exemple, à celle qu'absorbe une horloge en marche normale, elle équivaudra simplement à l'adjonction d'une horloge atte-

La bonne conductibilité des fils est ensuite contrôlée en mesurant la résistance électrique du fil principal a (fig. 320) et successivement de chacun de ses embranchements b , b' , b'' , etc. Cette mesure se fait par l'une des méthodes indiquées dans la partie théorique avec l'aide d'une boîte de résistances d et en mettant successivement à la terre e , à travers son électro-aimant (tel que b''), chacun des circuits à contrôler. Si la résistance ainsi trouvée correspond à celle qui convient à la longueur aa de fil intercalé, augmentée de celle de b'' , le circuit

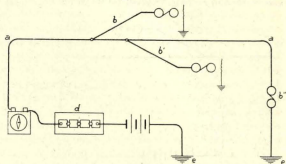


Fig. 320

est en bon état de conductibilité ; sinon il y a en lui une résistance anormale dont il faut découvrir le siège et qu'il s'agit d'éliminer. Ces résistances anormales sont presque toujours situées aux points de jonction de deux fils mal soudés, ou aussi dans une mauvaise communication à la terre.

La portion du courant total reçue par chaque horloge se mesure après que l'on a relié de nouveau toutes les horloges aux fils qui composent leurs circuits normaux, et après avoir mis en marche définitive l'horloge-mère qui commence alors ses fonctions de distributrice de courant. On se transporte ensuite successivement à chaque horloge secondaire et l'on s'assure, au moyen d'un voltmètre aperi-dique mis en dérivation avec elle, que celle-ci reçoit bien le nombre de volts voulu (entre 2 et 5 volts dans les réseaux marchant sous le

lée au fil, en plus de celles prévues, et dans ces conditions, le groupe lui-même n'éprouvera aucune perturbation lors de la mise en marche ; il y aura simplement une dépense de courant un peu plus forte que celle qui devrait avoir lieu. Malgré cela, il faut absolument éviter de laisser une telle perte non corrigée, car sa valeur peut fort bien augmenter dans la suite et atteindre des proportions incompatibles avec la bonne marche du groupe.

régime de 150 ohms, entre 8 et 12 volts dans les réseaux marchant à 1000 ohms, etc.).

Les vérifications ci-dessus énumérées une fois faites, on peut procéder à la mise en marche définitive de toutes les parties du réseau.

Surveillance et entretien du réseau.

La bonne marche d'un système d'horloges électriques unifiées dépend, au plus haut degré, d'une surveillance intelligente et d'un entretien consciencieux des différentes parties qui le composent.

Parmi ces parties, les unes, comme les horloges secondaires, peuvent fonctionner pendant des années consécutives sans qu'il soit nécessaire d'y toucher ; d'autres, comme le générateur de courant, doivent être fréquemment contrôlées et au besoin réparées. Ce contrôle, lorsqu'il est fait méthodiquement et en suivant exactement les instructions détaillées que fournissent les fabricants de piles et d'accumulateurs, ne donne lieu à aucune difficulté.

L'horloge-mère et les fils exigent aussi quelque surveillance, la première à cause des contacts-interrupteurs de groupes qui, à la longue, se salissent et nécessitent un nettoyage ; les seconds, lorsqu'ils sont exposés aux chocs extérieurs ou à des actions chimiques qui les détériorent, eux ou leur enveloppe isolante.

Entretien des horloges secondaires. — Il consiste surtout dans le nettoyage du mécanisme et dans le renouvellement des huiles des pivots et autres organes mobiles exigeant une lubrification. L'expérience a démontré que l'intervalle entre deux nettoyages consécutifs d'un même mécanisme peut varier de deux à douze et même quinze ans, selon que l'horloge qui le contient est plus ou moins exposée à la poussière et aux intempéries.

Entretien des appareils de la station centrale. — Ici la surveillance a lieu pour ainsi dire automatiquement du fait des visites périodiques que nécessite l'entretien du générateur de courant. Une visite quotidienne ou hebdomadaire ou même seulement mensuelle suffira à assurer le service parfait d'une centrale horaire (primaire ou secondaire) de moyenne ou faible capacité. Par contre, dans les centrales de grande capacité, la présence continue d'un employé au moins est nécessaire, afin de lire aussi souvent que le service l'exige, la bande de l'enregistreur contrôlant à distance la marche correcte des horloges-mères secondaires des sous-stations ho-

raires (cas des systèmes décrits aux pages 427 et 439) ou des horloges secondaires du type Normal-Zeit (p. 419).

Les organes d'une horloge-mère primaire ou secondaire qui nécessitent un entretien spécial sont :

- a) les surfaces de contact des interrupteurs ;
- b) les rouages et autres mécanismes.

Pour nettoyer un contact, on frotte avec précaution ses deux surfaces platinées au moyen de papier d'émeri fin, puis avec du papier blanc. Pendant cette opération il faut avoir soin de ne pas déformer les surfaces des interrupteurs. On veillera aussi à ne pas déplacer ni fausser les ressorts qui assurent ou portent ces contacts. Ordinairement, un contact bien défendu contre la poussière et les effets des extra-courants, mais devenu sale au bout d'un certain temps de fonctionnement, est simplement recouvert d'une légère couche d'oxyde métallique qui s'enlève d'un seul coup de papier d'émeri. D'autres fois cependant il arrive que les surfaces du contact sont légèrement creusées ; il faut alors frotter un peu plus longtemps pour faire disparaître la creusure ; si cette dernière était trop profonde et qu'on vit qu'en l'aplanissant tout à fait, on déformerait trop la surface du contact, il vaudrait mieux la laisser subsister ; mais alors il faudrait en nettoyer le fond.

L'entretien des rouages et autres organes mobiles de l'horloge-mère est le même que celui de n'importe quel mécanisme d'horlogerie : il faut, de temps en temps, les nettoyer et renouveler les huiles ; celles-ci doivent être de première qualité.

Entretien des fils. — En thèse générale, les fils, lorsqu'ils ont été bien et durablement installés, ne demandent, pendant de longues années, aucun entretien. Il faut cependant prévoir les cas de perturbations survenant ensuite de fautes de fils produites par des causes étrangères à l'installation même. Ces fautes sont presque toujours le fait d'ouvriers en bâtiment travaillant soit à l'extérieur, soit à l'intérieur des édifices porteurs des fils. Elles sont de trois sortes :

Ou bien la continuité métallique d'un ou de plusieurs fils n'existe plus, et alors le courant qui doit y circuler est totalement arrêté.

Ou bien un accident a introduit dans un des fils une résistance électrique anormale qui, ajoutée à la résistance normale du fil, oppose au courant un obstacle que celui-ci ne peut vaincre que partiellement et qui a pour effet d'empêcher ce courant d'arriver aux horloges avec la force voulue.

Ou bien enfin, il peut s'établir entre deux fils qui, normalement, doivent être isolés l'un de l'autre, une communication directe plus ou moins conductrice par laquelle le courant se précipite en grande partie, ou même, dans le cas le plus grave, en totalité, de telle sorte que l'horloge secondaire correspondante n'en reçoit point ou trop peu.

Ces trois cas sont caractérisés par les appellations suivantes :

1^o Rupture du fil conducteur.

2^o Résistance anormale introduite dans le conducteur.

3^o Défaut d'isolation du conducteur.

On trouvera plus loin l'indication succincte des méthodes à appliquer pour rechercher et localiser les fautes qui peuvent affecter non seulement les fils conducteurs du réseau, mais aussi ses autres parties.

Recherche et correction des défauts affectant la marche du réseau.

Un surveillant ne se contentera pas de *prévenir* les perturbations par un entretien consciencieux de toutes les parties composant un réseau d'horloges publiques, il devra être à chaque instant prêt à *remédier* rapidement à une perturbation quelconque que, pour une raison ou pour une autre, il n'aura pas su ou pu éviter.

Avant tout, c'est-à-dire avant de toucher en quoi que ce soit à l'un ou à l'autre des organes du réseau, il faut se rendre un compte exact de la manière dont la perturbation se manifeste ; autrement dit, il faut s'assurer :

a) Si la perturbation affecte une horloge isolée ou plusieurs, et dans ce dernier cas, si les cadrans en défaut appartiennent au même groupe ou à des groupes différents ;

b) Si les cadrans fautifs sont tous en retard du même nombre de minutes, ou bien si, au contraire, ce retard varie suivant les horloges ;

c) Si les cadrans en défaut sont arrêtés totalement, ou bien s'ils se remettent en marche d'une manière intermittente.

Reprenons successivement ces différents cas avec leurs diverses combinaisons.

1^o **Un cadran isolé est complètement arrêté.** — Il est évident que le défaut ne peut être ni à la pile ni à l'horloge-mère, puisque toutes les autres horloges marchent correctement. Il ne faut

pas non plus le chercher dans une isolation défectueuse de la ligne ou de ses embranchements, car alors les autres cadrans en seraient également affectés. Il faut le chercher soit dans le fil d'embranchement amenant le courant à l'horloge fautive, soit dans le fil des bobines de son électro-aimant, soit dans son fil de terre, soit enfin dans son mécanisme.

Le défaut peut être ou bien *mécanique*, et alors il consistera dans l'interposition d'un corps étranger empêchant les rouages de la minuterie ou l'axe de l'armature de fonctionner, ou bien *électrique*, et alors ce sera le courant qui aura été soit totalement supprimé à la suite d'une rupture du fil d'embranchement ou du fil de terre, ou du fil des bobines de l'électro-aimant, soit affaibli, au-dessous de la limite permise, par l'introduction d'une résistance anormale en un point de ces mêmes fils.

On recherchera auquel de ces défauts on a affaire en intercalant dans le circuit de l'horloge un galvanomètre, et en s'assurant si le courant passe et si oui, avec quelle intensité.

Si l'aiguille du galvanomètre ne décèle aucun courant, il y a rupture de fil.

Si elle ne décèle qu'un courant trop faible, il y a résistance anormale.

Si enfin le courant est normal, c'est le mécanisme de l'horloge qui est en défaut.

La rupture du fil devra avant tout être cherchée dans le fil des bobines de l'électro-aimant aux points d'entrée ou de sortie, puis dans le fil de terre, et enfin dans le fil d'embranchement ; la résistance anormale, à la soudure du fil de terre sur le tuyau de gaz ou d'eau, ou aux points de jonction de deux bouts de fil aérien, ou au câble d'entrée dans l'horloge.

2° Un cadran isolé est en retard et sa marche est intermittente. — Ici, il y a deux défauts possibles : l'un mécanique (rouages sales, pivots rouillés, aiguilles frottant sur le cadran), l'autre électrique, consistant en une résistance anormale dans le circuit ; on les différenciera au moyen du galvanomètre, comme on l'a indiqué ci-dessus.

3° Plusieurs horloges appartenant au même groupe sont totalement arrêtées. — Si le galvanomètre intercalé à l'une quelconque des horloges en défaut n'indique aucun courant, il y a rupture du fil d'embranchement (en x par exemple, fig. 321) commandant toutes les horloges arrêtées b , c , d , e . Il ne peut pas y avoir défaut

d'isolation de la ligne, puisque les horloges f , g , h , par exemple, marchent bien. Il n'est pas probable qu'il y ait résistance anormale en x , puisque, en c par exemple, le galvanomètre est resté immobile. Enfin, il n'est pas probable qu'il y ait un défaut mécanique survenu en même temps dans plusieurs horloges b , c , d , e .

Si, au contraire, le galvanomètre relié à l'une quelconque des horloges fautives indique un courant affaibli, il y a une résistance anormale en x .

4° Plusieurs horloges appartenant au même groupe ont une marche intermittente et sont en retard de la même quantité. — Encore ici, la solidarité existant entre les horloges en défaut permet de conclure à une faute du fil x qui les commande (fig. 321), et dont

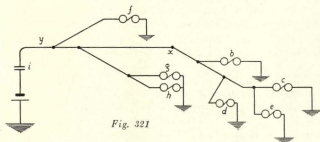


Fig. 321

la continuité n'existe qu'à certains moments. Ce cas se produit lorsqu'il y a en x une jonction mal faite (que l'on aurait, par exemple, oublié de souder : faute d'installation), et dans laquelle les deux bouts de fil, simplement tordus ensemble, peuvent dans certaines circonstances (ébranlement causé par le vent, mouvements de dilatation et de contraction occasionnés par des variations de température), cesser de se toucher *électriquement* tout en restant reliés *mécaniquement*. Cela arrive surtout lorsqu'une couche d'oxyde non conductrice s'est interposée en certains points des deux bouts de fil non soudés, de manière à compromettre parfois leur contact métallique.

5° Plusieurs horloges appartenant au même groupe ont une marche intermittente et sont en retard de quantités différentes. — Il faut distinguer ici entre les deux cas suivants :

a) Les horloges en défaut sont toutes groupées sur un même fil d'embranchement, tel que celui qui commence en x (fig. 321).

b) Elles sont situées sur des embranchements quelconques.

Dans le cas *a)*, il est probable qu'il y a en *x* une résistance anormale plus ou moins variable, occasionnant un affaiblissement de courant qui affecte, il est vrai, toutes les horloges *b, c, d, e*, mais les unes (les plus dures), plus que les autres. En effet, la régularité de fabrication des organes électriques et mécaniques des cadrans secondaires n'est jamais assez grande pour assurer à tous exactement la même sensibilité ; dès lors, un affaiblissement du courant pourra très bien occasionner des ratés chez quelques-uns d'entre eux, mais non pas chez d'autres ; si, au moment du passage d'émissions ultérieures, la résistance anormale a augmenté de valeur, et que, par suite, l'affaiblissement du courant soit devenu assez grand pour occasionner des ratés chez *toutes* les horloges dépendant du fil *x*, il s'établira entre ces dernières des différences de retard.

Une résistance anormale, telle que celle dont il vient d'être question, peut prendre naissance à une jonction de deux bouts de fil mal faite et surtout non soudée.

Dans le cas *b)*, le défaut doit être cherché dans le fil de ligne en *y* (fig. 321) (résistance anormale légèrement variable affectant les horloges les plus dures d'une manière différente, mais laissant encore marcher correctement les horloges sensibles), ou bien dans l'interrupteur *i* de l'horloge-mère correspondant au groupe fautif (surfaces de contact sales donnant aux émissions de courant des intensités affaiblies légèrement variables), ou bien enfin dans un défaut d'isolation des fils du groupe, détournant une quantité de courant inversement proportionnelle à sa résistance, et diminuant au delà de la limite permise l'intensité reçue aux horloges.

On trouvera lequel des défauts ci-dessus mentionnés est en cause, en mesurant le courant reçu par une horloge fautive, en contrôlant l'état de l'interrupteur du groupe, et, en dernier lieu, l'isolation de la ligne. Cette dernière opération, qui nécessite l'exclusion de toutes les horloges du groupe, ne doit être entreprise que si l'on a vainement essayé de trouver le défaut par un autre moyen moins radical.

6° Toutes les horloges du groupe sont totalement arrêtées. — Il y a rupture du fil de groupe en *y* (fig. 321), avant le premier embranchement.

7° Toutes les horloges du groupe sont en retard de la même quantité et marchent d'une manière intermittente. — Le cas est le même qu'en 4) ci-dessus, mais la jonction défectueuse doit être cherchée en *y*, au commencement du fil de groupe.

8° Toutes les horloges du groupe marchent d'une manière intermittente et sont en retard de quantités différentes. — Le cas est le même qu'en 5_a ci-dessus (le défaut est à chercher en *y*), ou bien qu'en 5_b, avec aggravation dans la variabilité des affaiblissements successifs produits soit par un interrupteur sale, soit par une faute d'isolation.

9° Toutes les horloges du réseau sont totalement arrêtées. — L'horloge-mère est elle-même arrêtée ; ou bien il y a rupture du fil de terre du centre de distribution, ou bien l'un des deux fils de la source de courant s'est détaché de son serre-fil ou s'est rompu, ou bien encore la communication entre deux éléments du générateur est coupée, ou bien, enfin, le vase d'un élément s'est cassé et a laissé échapper son liquide.

10° Il y a des horloges en retard dans tous les groupes, ou même seulement dans deux ou plusieurs groupes des plus chargés. — La pile ne fournit plus assez de courant ; il faut changer contre des éléments neufs ou restaurés les éléments fautifs, recherchés avec le voltmètre.

Ou bien c'est la communication à la terre de l'horloge-mère qui présente une résistance anormale constante ou variable.

Ou bien, enfin, c'est le renverseur de courant de l'horloge-mère qui est sale et doit être nettoyé.

Les applications scientifiques de l'Électrochronométrie.

Généralités. — Les applications de l'électricité aux recherches scientifiques de toute espèce sont innombrables. Leur domaine ne cesse de s'accroître. Celles d'entre elles qui ont pour base le *temps* et sa mesure exigeraient à elles seules, en textes et en figures, des développements considérables, qu'il ne serait possible d'adjoindre au présent ouvrage qu'en le surchargeant abusivement. Nous bornerons en conséquence notre excursion dans le champ des applications scientifiques de l'électrochronométrie, à celles qui ont pour but la conservation et la transmission de l'heure exacte dans les cas où cette heure doit être connue et mesurée à une petite fraction de seconde près. Cette réserve limitera ainsi les matières traitées dans le présent chapitre IX, à celles qui intéressent les observatoires astronomiques, les laboratoires scientifiques, les ateliers de réglage des fabriques de montres de précision, et en général tous les établissements, même industriels, où la simple heure civile distribuée, par exemple, au moyen d'appareils horaires unifiés battant la minute, serait insuffisante.

Plusieurs des instruments employés couramment aujourd'hui, dans les observatoires notamment, pour mettre, d'une manière continue, l'heure exacte à la portée des astronomes dans les diverses salles où ils ont à s'occuper, ont déjà fait, au cours du présent ouvrage, l'objet de descriptions détaillées, auxquelles nous pouvons purement et simplement renvoyer ici le lecteur. Telles sont entre autres les pendules fondamentales conservant et distribuant le temps sidéral et le temps moyen. Elles constituent la base même du service horaire de tels établissements ; les régulateurs de haute précision de Riefler (p. 177), de Hipp (p. 238), de Favarger & C^{ie} (p. 264), enfermés ou non en vases clos, en fournissent les modèles

les plus perfectionnés. Tels sont aussi les compteurs électrochronométriques à armatures polarisées battant la seconde (p. 306 et 316) qui, reliés soit directement, soit indirectement (par relais interposés), avec les pendules fondamentales, distribuent électriquement l'heure exacte dans tous les locaux où elle est nécessaire. Telles sont encore les pendules secondaires (avec ou sans cadrans) qui, synchronisées par ces mêmes pendules fondamentales, battent à l'unisson avec celles-ci et qui, munies elles-mêmes de contacts-interrupteurs appropriés, peuvent commander à leur tour, sans que la marche correcte de leurs directrices en soit le moins du monde perturbée, un nombre quelconque d'appareils électromagnétiques secondaires, tels que compteurs électrochronométriques battant la seconde, la minute ou toute autre fraction de temps, chronographes enregistreurs, pendules synchronisées de second, de troisième, etc., ordre, enregistreurs météorologiques, etc.

Par contre, parmi les appareils horaires en usage dans les recherches scientifiques qui, bien que déjà mentionnés à diverses reprises dans les pages précédentes, n'ont pas encore été décrits ni représentés jusqu'ici, se trouvent précisément ceux qui mesurent des fractions de temps inférieures à celles que limitent les battements d'une horloge ordinaire ou d'une montre de bord ou de poche pourvues d'échappements à ancre, à chevilles ou à cylindre, ou de compteurs électrochronométriques battant la seconde ou même la demi-seconde. Il y a en effet une foule de cas où il est utile, voire nécessaire, de pouvoir apprécier, soit par aiguilles ou index parcourant leurs cadrans, soit par signaux permanents s'inscrivant à demeure sur une surface d'enregistrement, les dixièmes, centièmes, millièmes, etc., de seconde.

Ces cas se présentent en astronomie, lorsqu'il s'agit d'observer l'instant précis où un astre quelconque ou son centre de figure passe dans l'axe de la lunette méridienne, ou de déterminer les différences de longitude entre divers points de la surface terrestre, etc. ; en physique, dans de nombreuses expériences relatives à la vitesse du son, de la lumière, de la chute des corps, etc. ; en balistique, pour mesurer la vitesse initiale des projectiles ou la rapidité d'inflammation des poudres ; en hydraulique, pour noter simultanément les quantités d'eau passant par les aubes d'une turbine et les vitesses de rotation correspondantes, etc. ; en physiologie et en psychologie expérimentale, dans l'art du médecin, de l'ingénieur, de l'aviateur ; dans les courses sportives, etc., etc.

Chronoscopes et chronographes.

Les appareils électromagnétiques permettant d'apprécier de très petites fractions de temps s'appellent *chronoscopes* ou *chronographes*, selon qu'ils indiquent ce temps d'une manière fugitive, sur un ou plusieurs cadrans, ou bien qu'ils l'inscrivent d'une manière permanente sur une surface d'enregistrement. Dans les deux cas ils comportent un mouvement d'horlogerie très exactement réglé par

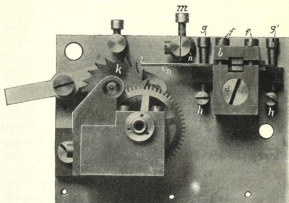


Fig. 322

un régulateur à action continue, tel que le volant à ailettes autorégulatrices, le pendule conique, etc. Toutefois, la puissance réglante de ces organes ne s'étant pas révélée, à l'expérience, assez grande, Hipp créa, de toutes pièces, son *échappement mécanique à lame vibrante* et l'appliqua avec un succès immédiat et définitif au réglage des rouages à marche pratiquement non-saccadée.¹

La figure 322 donne le détail de ce mécanisme : *a* est la lame

¹ Théoriquement, cette marche est encore saccadée, puisque la lame vibrante, quelque élevée que soit le nombre de ses vibrations par seconde, ne laisse avancer la roue d'échappement, dernier mobile de ce rouage, que par sauts successifs. En fait, aucune machine, faite de main d'homme, ne réalise la progression parfaitement continue et uniforme d'un mobile; toujours celui-ci passe de l'une de ses positions à l'autre infiniment voisine, en procédant par sauts successifs; toute l'ingéniosité du mécanicien est employée, dans le problème qui nous occupe ici, à rendre aussi courts et aussi constants que possible, en durée, les *repos* séparant deux changements de position consécutifs effectués par ledit mobile en un point quelconque de sa trajectoire.

vibrante qui, dans les chronoscopes fait mille, et dans les chronographes 200 vibrations par seconde. Cette lame, qui est en acier trempé dur et dont les dimensions sont établies de manière à donner le son musical correspondant rigoureusement à ces deux nombres de vibrations, est solidement encastrée, par l'une de ses extrémités, dans une forte mâchoire b dont la partie inférieure est fixée contre la face intérieure de l'une des deux platines de la cage du rouage, au moyen d'une forte vis à collet d autour de laquelle elle peut tourner à frottement dur.

La partie supérieure de cette mâchoire est vissée sur l'autre au moyen de 4 vis f et serre ainsi la lame vibrante a . Deux autres vis g g' , à pas fin, dont les extrémités inférieures s'appuient sur des tenons fixes h h et qui sont portées par des prolongements latéraux de la mâchoire inférieure, permettent lorsqu'on visse l'une et dévisse l'autre, ou inversement lorsqu'on dévisse l'une et visse l'autre, de faire très légèrement tourner autour de la vis d tout le système porte-lame, ce qui a pour effet de rapprocher ou d'éloigner de la roue k l'extrémité vibrante l de la lame a , et par conséquent de régler très exactement leurs positions relatives. Enfin la vis m du plot fixe n a pour but de régler l'amplitude des vibrations de la lame ; cette vis est souvent remplacée par une « sourdine », petit plot garni de drap qui, pouvant se déplacer le long de la lame, permet de modifier quelque peu le nombre des vibrations et par suite la vitesse du train d'horlogerie.

La roue dentée k , que nous appellerons *roue d'échappement*, est calée sur le dernier mobile de ce train. Elle a un nombre de dents en rapport avec la vitesse que doit avoir ce mobile et qui est telle qu'il passe une dent de la roue k à chaque vibration de a . Si la roue k a vingt dents et que la lame fasse mille vibrations par seconde, le mobile tournera à raison de $\frac{1000}{20} = 50$ tours par seconde.

Lorsque le réglage des positions relatives de la lame vibrante et du cercle décrit par les extrémités des dents de la roue k est bien fait, il n'y a pas contact direct entre les matières même de ces deux organes, en sorte que ceux-ci ne sont pas sujets à usure ; les petits choes réguliers et successifs qui entretiennent le mouvement vibratoire de la lame régulatrice se font par l'intermédiaire d'un petit coussin d'air élastique qui empêche ce contact direct et assure la conservation indéfinie des dents de la roue k et du bout de la lame a .

Pour mettre en marche le rouage, on manœuvre à la main un axe

à leviers qui libère la roue *k* en soulevant pendant un court instant l'extrémité *l* de la lame vibrante. L'arrêt se produit quand on tourne cet axe en sens inverse. Lorsque cela est nécessaire, la mise en marche et l'arrêt du rouage peuvent être effectués à distance au moyen d'une détente électromagnétique appropriée.

Chronoscopes. — Les figures 323, 324 et 325 donnent, la première une vue d'ensemble, et les deux autres des vues de côté et de derrière

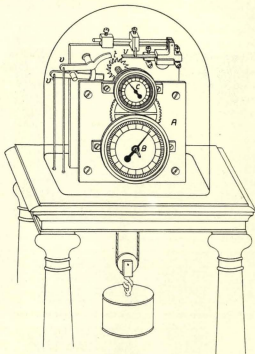


Fig. 323

du chronoscope de Hipp sous sa forme la plus répandue. On voit en *A* le mouvement d'horlogerie avec ses divers mobiles à engrenages *abcde* dont le dernier est la roue d'échappement *t* (fig. 323) sur les dents de laquelle réagit la lame vibrante *u*. Des deux aiguilles *B* et *C*, l'une indique les dixièmes, l'autre les millièmes de seconde.

L'axe de l'avant-dernier mobile *e* (fig. 324), qui est creux, porte

non loin de son extrémité antérieure, une roue à dents de côté f' ayant un grand nombre de dents de forme triangulaire. Dans l'intérieur de l'axe creux se trouve un axe plein, indépendant du creux (sans aucun frottement avec lui), et dont l'extrémité antérieure porte l'aiguille C des millièmes de seconde et un pignon transmettant le mouvement de cet axe plein à l'aiguille B des dixièmes de seconde par l'intermédiaire des roues et pignons qui sont logés entre les cadrans et la platine antérieure du mouvement d'horlogerie (fig. 324). Ce même axe plein porte une bride x qui peut être en prise soit avec la roue à dents de côté f' de l'axe creux, soit avec une seconde roue de même espèce f placée en face de la première, mais fixée à la platine. Lorsque la bride est en prise avec f' , les deux aiguilles participent au mouvement du rouage bcd et parcourent leurs cadrans ; lorsque la bride est en prise avec la roue fixe f , les aiguilles sont arrêtées.

C'est l'armature y (fig. 324 et 325) commune à deux électro-aimants m et n se faisant vis-à-vis, qui, par l'intermédiaire du bras h et en oscillant autour de l'axe z , entre m et n , transmet à l'axe plein et par suite à la bride x , le petit mouvement longitudinal produisant la mise en marche ou l'arrêt des aiguilles ; r et r' sont deux ressorts antagonistes agissant sur le levier d'armature y ; on peut les régler au moyen des excentriques à leviers s et s' .

Le levier v (fig. 323) sert à mettre en marche le mouvement d'horlogerie ; grâce à une combinaison de ressorts, la manœuvre de ce

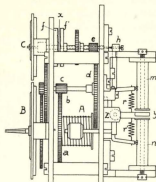


Fig. 324

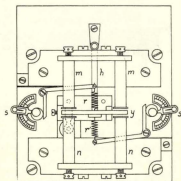


Fig. 325

levier, en même temps qu'elle libère la roue d'échappement t , lui donne une vive impulsion qui fait entrer la lame u en vibration et fait intervenir immédiatement la vitesse de régime.

Le levier v' arrête, lorsqu'on le tire par son cordon, la marche des rouages. Les électro-aimants m et n , dont on a supprimé les bobines sur le dessin, afin de ne pas le surcharger, sont mis en relation, au moyen de fils électriques, avec les interrupteurs qui sont chargés d'établir ou de couper le circuit de la pile, au commencement et à la

fin du phénomène dont on veut mesurer la durée exacte.

Si c'est l'électro-aimant supérieur m que l'on intercale dans le circuit extérieur (de la pile et du ou des interrupteurs), on tendra le ressort antagoniste r' , et alors le courant lancé dans m attirera l'armature y et arrêtera les aiguilles, tandis que l'interruption de ce courant aura pour effet de les faire tourner.

Si, au contraire, le courant agit sur l'électro-aimant inférieur n et si l'on tend le ressort r , ce sera l'absence de courant qui produira l'ar-

rêt des aiguilles et son rétablissement qui provoquera leur mise en marche.

La mise en jeu des interrupteurs peut avoir lieu soit automatiquement, soit manuellement.

S'il s'agit, par exemple, de mesurer, en millièmes de seconde, le temps que met un projectile à parcourir une certaine portion connue de sa trajectoire, ou un corps à tomber d'une hauteur donnée, c'est le projectile et le corps pesant qui produiront eux-mêmes, au départ et à l'arrivée, les fermetures et les ruptures de courant libérant et arrêtant les aiguilles du chronoscope.

D'autre part, si l'on veut déterminer le temps qui s'écoule entre l'instant précis où un phénomène quelconque se produit ou commence à se produire, et l'instant où la personne qui l'observe s'en rend

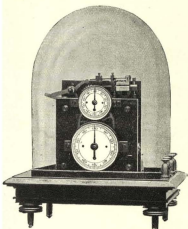


Fig. 326

compte et le signale par une pression sur un bouton électrique (tope), on s'arrange de manière que le phénomène lui-même, ou tout au moins un organe indissolublement lié avec lui, mette en marche automatiquement les aiguilles du chronoscope et que celles-ci soient arrêtées par la pression opérée sur la touche du tope. Le temps de marche des aiguilles donne alors, en millièmes de seconde, la valeur de ce qu'en astronomie et en psychologie expérimentale on appelle *l'équation personnelle* de l'observateur.

La diversité des phénomènes mesurables en durée au moyen du

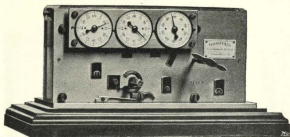


Fig. 327

chronoscope de Hipp est telle qu'il y a intérêt à pouvoir, à volonté, mettre en marche les aiguilles soit par établissement, soit par rupture d'un circuit électrique et, de même, les arrêter soit par l'un, soit par l'autre procédé. La planche VII donne une idée des nombreuses combinaisons auxquelles permet de satisfaire la présence des deux électro-aimants *m* et *n*.

La figure 326 donne l'aspect extérieur d'un chronoscope de Hipp dont le moteur est un ressort de barillet et qui, de ce fait, est plus transportable que le type à poids de la figure 323.

La figure 327 représente un chronoscope grand modèle à 3 cadrans dont le premier à gauche indique les minutes, le deuxième les secondes, et le troisième les centièmes de seconde.

Chronoscope multiple à 4 paires de cadrans. — Enfin les figures 328 et 329 représentent les vues de devant et de derrière d'un type spécial de chronoscope à lame vibrante qui a été établi par la maison Favarger & C^{ie}, de Neuchâtel, et qui présente les particularités suivantes :

Son mouvement d'horlogerie, très robuste, a pour moteur un ou plusieurs barillets à ressorts, que l'on remonte au moyen d'un arbre longitudinal et d'une manivelle dont l'extrémité droite de cet arbre est pourvue. Ce même arbre porte autant de portions de vis sans fin qu'il y a de barillets à remonter ; le nombre des barillets est déterminé par la durée de marche plus ou moins longue que l'instrument doit avoir pour un seul et même remontage effectué à refus.

La platine antérieure de l'appareil est munie de 4 paires de cadrans chronoscopiques possédant chacune un électro-aimant simple de mise en marche et d'arrêt des aiguilles. Des deux aiguilles

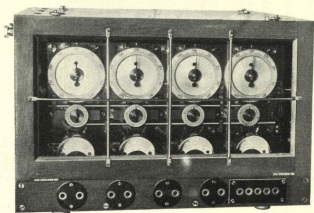


Fig. 328

de chaque paire de cadrans, l'une, la supérieure, montre les millièmes de seconde sur son cadran divisé en 100 parties, l'autre, l'inférieure, dont le cadran est divisé en 20 parties, montre les dixièmes de seconde. Les deux aiguilles d'une même paire de cadrans sont solidarisées par une minuterie de telle façon que pendant que l'aiguille inférieure parcourt une des 20 divisions de son cadran, l'aiguille du cadran supérieur fait un tour complet ; l'aiguille du cadran inférieur *compte* ainsi le nombre de tours de l'aiguille supérieure.

Une seule lame vibrante de Hipp règle le déroulement des divers mobiles du mouvement d'horlogerie proprement dit ; par contre chaque paire de cadrans possède son axe creux, son axe plein à bride mobile longitudinalement et enfin ses deux roues à dents de côté,

l'une fixe, l'autre tournante. Il résulte de cette disposition que les deux aiguilles de chaque paire de cadrans peuvent être mises en marche ou arrêtées par l'armature de l'électro-aimant correspondant (selon que celle-ci est attirée ou non), indépendamment des aiguilles des autres paires de cadrans ; en un mot, chacun des quatre groupes indicateurs peut marcher ou être arrêté pour son compte et par conséquent l'appareil renseigner l'observateur sur la durée exacte de quatre phénomènes indépendants les uns des autres, bien que presque simultanés.

Supposons, par exemple, qu'il s'agisse de comparer rapidement

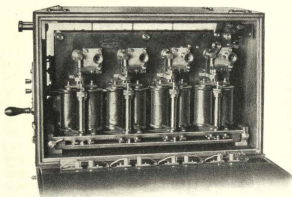


Fig. 329

entre elles les équations personnelles de trois observateurs placés dans les mêmes conditions d'espace et de temps. Il faudra, pour cela, déterminer ces équations au moyen d'un seul et même phénomène observé et signalé par eux, phénomène qui pourra intéresser séparément ou simultanément un ou deux ou trois des divers sens de la vue, de l'ouïe ou du toucher (saut inattendu d'un compteur électro-chronométrique, coup unique frappé sur un timbre, secousse électrique, etc.). On disposera les 4 circuits comme suit : les aiguilles de la première paire de cadrans seront commandées par un courant fermé automatiquement par le phénomène lui-même, au moment précis de son apparition effective, tandis que les aiguilles des trois autres paires le seront respectivement par les topes des

trois observateurs. Le nombre de millièmes de seconde que chaque paire d'aiguilles indiquera en plus du nombre qui figurera sur la première paire, donnera immédiatement la valeur de chacune des trois équations personnelles cherchées.

De nombreuses autres expériences peuvent être faites à l'aide

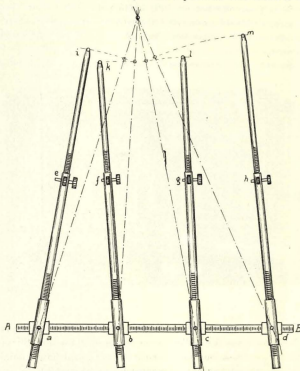


Fig. 330

de l'instrument que nous venons de décrire. Il a rendu entre autres de grands services à l'armée russe durant les premières années de la guerre de 1914 comme récepteur électromagnétique pour installations de repérage, par le son, de la position exacte d'une pièce ou d'une batterie d'artillerie ennemie. Voici comment, dans ce cas, l'expérience est organisée :

Sur une *base* mesurée, aussi longue que possible, sont échelon-

nés, à des distances connues, 4 postes dits *d'écoute* qui, reliés par des fils électriques avec les électro-aimants du récepteur chronoscopique, leur envoient (automatiquement par microphones, ou non-automatiquement au moyen de topes pressés à la main par quatre soldats intelligents), une émission de courant au moment précis où chacun d'eux *perçoit* la détonation annonçant le départ du projectile de la pièce à repérer. Les instants de cette perception sont différents pour chaque poste d'écoute, puisque ceux-ci sont à des distances différentes du centre de détonation. Si donc, au moment où va se faire l'expérience, l'opérateur placé près du récepteur met en marche simultanément, en les faisant partir du 0, les aiguilles des paires de cadrans et place, tôt après, les circuits des électro-aimants dans leur position de réception indépendante, les aiguilles de chaque paire s'arrêteront successivement sur un chiffre de millièmes de seconde qui sera proportionnel à la différence de distance séparant le centre de détonation des postes d'écoute correspondants. Cette proportionnalité est la conséquence du fait expérimental que le son a dans l'air libre, à 15°, une vitesse uniforme d'environ 340 mètres par seconde. Les aiguilles du récepteur chronoscopique une fois toutes arrêtées, on fait la lecture de leurs différentes positions ; on note celles-ci et on les utilise ensuite au moyen de l'instrument accessoire représenté par la figure 330 ci-contre et d'une carte de la région établie à une échelle convenable : *AB* est une règle graduée sur laquelle peuvent coulisser 4 curseurs *abcd* portant chacun un pivot. Sur chacun des quatre pivots est articulé à frottement doux l'extrémité d'un tube tel que *ae* ; dans ce tube coulisse à son tour, dans le prolongement de *ae*, une réglette graduée telle que *ei*. On comprend immédiatement que la règle *AB* représente, à l'échelle de la carte, la base des postes d'écoute, que les pivots des curseurs *abcd* sont répartis le long de *AB* exactement comme ces postes eux-mêmes le long de la base effective, que les tubes se terminant en *efgh* sont tous de même longueur et peuvent en outre être allongés ou raccourcis simultanément et de la même quantité, au moyen d'un dispositif approprié (non représenté sur la figure, mais facile à concevoir) ; qu'enfin si l'on fait les longueurs émergentes de 3 des réglottes graduées égales, ou plutôt proportionnelles, exactement aux trois nombres représentant, en millièmes de seconde, les trois indications différentes les plus élevées lues tout à l'heure sur trois des paires de cadrans chronoscopiques (ces trois paires peuvent être quelconques, en rang, de gauche à droite, la

quatrième réglette correspondant à l'indication la moins élevée de la 4^{me} paire), on pourra, en faisant tourner des angles voulus les extrémités inférieures des tubes sur les pivots de leurs curseurs respectifs, rassembler en *un seul et même point* les 4 extrémités supérieures des réglottes graduées (armées là de 4 pointes fines perpendiculaires à leur plan), rassembler, disons-nous, en un seul et même point de ce plan, les 4 extrémités *iklm*, à condition toutefois que l'on ait préalablement allongé ou raccourci l'ensemble des 4 tubes *ae*, *bf*, *cg*, *dh*, de manière précisément à permettre ce rassemblement. Ce point donnera la *position exacte du centre de détonation cherché*, aussitôt que, ayant appliqué la règle *AB* sur la carte à l'échelle de manière à faire coïncider les pivots des curseurs *abcd* avec les points de cette carte correspondant aux 4 postes d'écoute, on aura de nouveau rassemblée là en une seule les 4 pointes *iklm*.

Dans l'exposé ci-dessus, on n'a pas parlé des *corrections* qui doivent être apportées aux indications brutes du récepteur chronoscopique pour tenir compte des modifications que subit la vitesse du son par suite d'un vent plus ou moins fort tendant à aider ou à contrarier la propagation de l'onde sonore, par suite aussi d'une température supérieure ou inférieure à 15°, qui régnerait, le cas échéant, au moment de l'expérience.

Des tables dressées d'avance permettent d'apprécier les effets du facteur température, tandis que l'intensité du vent et sa direction doivent être déterminées au moyen d'*anémomètres* appropriés qui constituent l'un des accessoires indispensables de l'installation de repérage décrite ci-dessus¹. Il ne faut d'ailleurs pas s'exagérer l'importance des corrections dont nous venons de parler, car elles n'entrent guère en ligne de compte que si la température et le vent régnant influencent très différemment les 4 trajectoires du son allant du centre de détonation aux postes d'écoute.

Chronographes enregistreurs.

Généralités. — Un chronographe enregistreur permet de substituer à la mesure directe du temps, effectuée le plus souvent au moyen d'une aiguille parcourant plus ou moins rapidement un ou plusieurs

¹ Les appareils essentiels de cette installation et notamment ceux des figures 328, 329 et 330 ont été très judicieusement imaginés, étudiés et construits par M. Jean Abegglen, déjà plusieurs fois nommé au cours de cet ouvrage.

cadrons divisés, la mesure d'une *longueur* proportionnelle à ce temps.

Selon que l'unité de temps choisie, qui est ordinairement la seconde, doit être subdivisée en un plus ou moins grand nombre de fractions de seconde, toutes égales entre elles, la portion de longueur représentant la seconde doit être plus ou moins grande. Chez les chronographes les plus répandus, tels qu'on les emploie couramment dans les observatoires, par exemple, la longueur de la seconde chronographique est le plus souvent de 10 millimètres ; mais elle peut aussi être autre et varier entre 1 et 100 millimètres ou plus.

Encore ici nous devons distinguer entre le *transmetteur* qui réagit à distance sur le récepteur chronographique et ce *récepteur* lui-même.

Le transmetteur peut être, comme dans le cas du chronoscope, automatique ou manuel. Lorsqu'il est manuel, il consiste en un bouton électrique en forme de poire, auquel les astronomes ont donné le nom de *tope*. La figure 331 en donne la vue extérieure. La touche centrale est disposée de manière à pouvoir être poussée ou abandonnée (à son ressort antagoniste intérieur) avec une grande précision au moyen du pouce, le corps du *tope* étant lui-même tenu entre l'index et le majeur de la main.



Fig. 331

Lorsque le transmetteur est automatique, c'est, le plus souvent, une horloge à contacts qui le ferme et l'ouvre ; mais ce peut être aussi, comme dans le chronoscope, un organe quelconque dont le jeu est matériellement solidaire du phénomène observé.

Quant au *récepteur chronographique*, il consiste en une surface d'enregistrement recevant, d'un train d'horlogerie convenablement réglé, un mouvement régulier de translation.

Dans les chronographes dits à *cylindre*, la disposition des organes est généralement la suivante :

Un cylindre, aussi léger que possible, dont l'axe peut être vertical ou horizontal, a sa surface garnie d'une feuille de papier ou noircie au noir de fumée. Un train d'horlogerie, dont le moteur est un poids ou un ressort, produit le mouvement de rotation du cylindre. Le traceur est commandé par un électro-aimant, de telle façon que l'attraction de son armature provoque un léger déplacement de la pointe du traceur dans une direction parallèle à la génératrice du cylindre. Des courants intermittents animant l'électro-aimant auront donc

pour effet de marquer sur la surface du cylindre une ligne sinueuse ou brisée.

Le traceur et son électro-aimant ne sont pas absolument fixes : ils sont montés sur un chariot pouvant rouler sur un chemin de fer ; une vis, ou un système de renvois en relation avec le train d'horlogerie, communique au chariot un mouvement lent de translation parallèlement à l'axe du cylindre. Il résulte de là que la ligne brisée tracée à la surface du cylindre est en *hélice*, ce qui permet d'employer toute la longueur du cylindre pour une ou plusieurs observations successives.

Le plus souvent, le chariot porte deux électro-aimants et deux traceurs ; l'un de ceux-ci est mis en relation avec le transmetteur (automatique ou non) chargé d'expédier les courants marquant le commencement et la fin du phénomène que l'on observe ; l'autre reçoit, d'une pendule bien réglée ou d'un diapason, des courants intermittents régulièrement espacés, qui provoquent le tracé d'une ligne brisée régulière juxtaposée à celle du premier traceur. On a ainsi un moyen facile et exact de relier au temps les indications relatives au phénomène observé.

Les différents systèmes de chronographes, dont nous allons décrire les plus intéressants, peuvent tous être ramenés en principe à la disposition que nous venons d'indiquer.

Les différences qu'il peut y avoir entre eux portent essentiellement :

a) Sur le moyen employé pour régulariser aussi exactement que possible le mouvement du train d'horlogerie ;

b) Sur la forme et le mode de déroulement du papier enregistreur : le cylindre dont nous avons parlé tout à l'heure est souvent remplacé par une bande de papier sans fin qui est en provision sur une roue, et qui se déroule d'une manière analogue à celle qu'on emploie pour les télégraphes Morse, ou bien aussi par un plateau circulaire horizontal mobile autour d'un axe vertical, et sur lequel le traceur se meut du centre à la circonférence suivant un rayon ;

c) Sur la plus ou moins grande vitesse de la surface d'enregistrement. Cette vitesse qui, dans certains chronographes à mouvement lent, ne dépasse pas 2 mm. par seconde, atteint chez d'autres appareils très sensibles 25 m. par seconde. Avec ces derniers, on a pu apprécier les millièmes de seconde ;

d) Sur la manière dont le traceur est impressionné par le courant électrique. Dans certains appareils, le traceur, au lieu d'être

commandé par un électro-aimant, sert lui-même de conducteur à un courant de forte tension, et les traces fournies sont alors de simples points produits par l'étincelle électrique ;

e) Enfin, sur la manière dont les traces fournies peuvent être rapportées à la mesure du temps. On peut, ou bien, comme nous l'avons dit, employer un traceur des temps commandé par l'interrupteur d'une pendule à secondes ou par un électro-diapason, ou bien déterminer la position des traces chronographiques au moyen d'un compteur de tours, avec vernier pour les fractions de tour.

Chronographe à cylindre de Hipp. — Cet appareil, qui est à mouvement lent, est représenté par la figure 332. Le cylindre enregistreur se voit en *a* ; le chariot *b*, qui porte deux électro-aimants, dont l'un se voit en *c* (l'autre étant caché par le premier), est mobile sur les deux rails *d* parallèles à l'axe du cylindre. Le mouvement d'horlogerie *e*, composé d'un certain nombre de mobiles, est à poids. Il fait tourner d'une part le cylindre *a* qui, pour diminuer les résistances dues au frottement, roule sur des galets, d'autre part la vis *g* communiquant au chariot *b* son mouvement longitudinal de translation.

Chaque traceur consiste en une plume *f*, dite à siphon, recourbée de manière à présenter deux branches, dont l'une, taillée en pointe, marque sur le

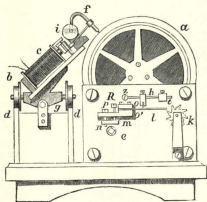


Fig. 332

papier les indications chronographiques, et dont l'autre plonge continuellement dans un petit réservoir d'encre à glycérine que l'on voit en *i*, et qui est disposé de telle façon que le niveau de l'encre soit légèrement au-dessus de l'extrémité traçante. Les deux branches sont naturellement reliées entre elles par un canal à section circulaire ou rectangulaire qui, d'après la loi du siphon, alimente d'une façon continue la pointe du traceur. Un levier, que l'on manœuvre à la main, permet d'éloigner les plumes du

papier enregistreur lorsque le cylindre est au repos, et empêche ainsi la formation des taches qui se produiraient si la plume-siphon était en contact prolongé avec le papier immobile.

On voit en *R* le régulateur à lame vibrante de Hipp disposé ici un peu autrement que nous ne l'avons indiqué dans la figure 322 de la page 502. *l* est la lame vibrante, *k* la roue d'échappement, *o* et *o'* la mâchoire, *p* les vis de réglage de celle-ci, *zht* la « sourdine » (p. 503) avec son axe fixe *z* et son contrepoids *t*.

Lorsque l'appareil est au repos, la roue dentée *k* est retenue par un ressort qui fait frein sur une de ses faces. Le levier qui permet de mettre en marche le mouvement d'horlogerie a trois fonctions :

- Libérer la roue *k* en écartant le ressort-frein ;
- éloigner pendant un instant la lame vibrante, de façon que son extrémité ne touche pas les dents de *k*, et que celle-ci défile à vide jusqu'à ce qu'elle ait dépassé la vitesse de régime ;

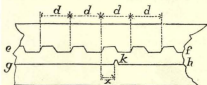


Fig. 333

sous l'influence des chocs successifs produits par les dents de la roue, entre en vibration et commence son rôle de régulateur de mouvement ; ce rôle est tel qu'une dent passe à chaque vibration de la lame. Celle-ci donne alors une note continue semblable à celle d'une sirène, et il est facile de se rendre compte par l'oreille si l'appareil a bien la vitesse qu'il doit avoir.

Les armatures des deux électro-aimants du chariot *b* réagissent sur les plumes-siphons, de manière à faire tracer à celles-ci une ligne brisée à angles vifs qui, grâce au mouvement de translation du chariot, se déroule en hélice sur toute la surface du cylindre enregistreur. L'un des électro-aimants est mis en relation avec l'interrupteur à seconde d'une pendule, et la plume correspondante trace alors une ligne brisée à ressauts réguliers telle que *ef* (fig. 333) : les distances *d*, toutes égales entre elles, donnent la longueur des secondes de temps. L'autre électro-aimant est relié avec l'interrupteur dépendant du phénomène à observer, et sa plume trace en *gh* une seconde ligne sur laquelle apparaissent à intervalles quel-

conques des ressauts tels que k ; ceux-ci marquent les différentes phases du phénomène, et on relève leur position exacte en mesurant la distance x qui les sépare du commencement ou de la fin de la seconde la plus rapprochée. Le numéro d'ordre de cette seconde se déduit facilement en comptant le nombre de secondes écoulées depuis une seconde prise comme point de départ.

Chronographe à bande de Hipp (fig. 334 et 335). — Cet appareil a l'aspect d'un télégraphe Morse. La bande de papier en provision sur la roue a se déroule en passant entre les deux cylindres b , b' , dont l'un, b' , est calé sur l'un des mobiles du mouvement d'horlogerie contenu entre les platines c , c' . Les deux plumes, avec leurs encriers-réservoirs d , se voient en e ; elles sont fixées aux extrémités de deux leviers horizontaux f , f' , articulés sur deux pièces coudées faisant corps avec les armatures i , i' , des deux électro-aimants fixes k , k' . (Ici la bande de papier se déroulant d'une manière continue, on a pu supprimer le chariot mobile portant les électro-aimants.)

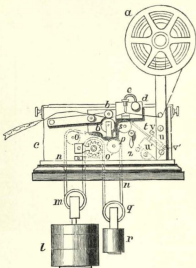


Fig. 334

Le moteur du train d'horlogerie est un poids l , dont la poulie m est embrassée par une chaîne sans fin nn . Celle-ci, après avoir passé, comme l'indique la figure, sur les dents d'une roue motrice o , sur celles d'une roue de remontage o' , et sur la poulie-guide p , redescend pour embrasser la poulie q du contrepoids r . Cette disposition du poids moteur permet de le remonter sans troubler la marche régulière de l'appareil, ce qui est d'une grande utilité lorsqu'on a à faire un grand nombre d'observations successives sans arrêt.

Le régulateur du train d'horlogerie est la lame vibrante de Hipp ;

il est contenu tout entier entre les deux platines c, c' , et est représenté en pointillé sur la figure 334 ; s est la roue d'échappement, t la lame vibrante, u, u' , les mâchoires réglables au moyen des vis v, v' , enfin z est la poignée du levier d'arrêtage et de mise en marche.

Les indications chronographiques sont d'ailleurs exactement semblables à celles du chronographe à cylindre ci-dessus décrit, et les deux électro-aimants k, k' , reliés de la même façon avec les interrupteurs correspondants.

Le chronographe à bande tel que nous venons de le décrire a été, dans la suite, adapté soit par Hipp, soit par ses successeurs, à de nouvelles et nombreuses applications scientifiques et techniques.

C'est ainsi que dans certains types on a substitué à la mise en marche ou à l'arrêt manuel du train d'horlogerie, une détente électromagnétique à armature polarisée, permettant d'obtenir les deux effets à distance, par l'envoi alternatif de deux émissions de courant, l'une

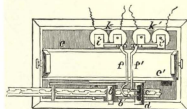


Fig. 335

positive (mise en marche), l'autre négative (arrêt) (fig. 336).

C'est ainsi encore que d'une part, pour rendre les instruments plus transportables, on a remplacé le lourd poids moteur avec contrepoids et chaîne sans fin de la figure 334, par un barillet à ressort et que, d'autre part, on a augmenté jusqu'à deux heures et plus, la durée de marche qu'un chronographe à poids est susceptible de fournir, pour un seul et même remontage de son poids moteur, renforcé en conséquence.

C'est ainsi encore que pour réunir en un seul et même appareil transportable, à l'usage des géodésiens et des explorateurs, le récepteur chronographique à deux traceurs, le transmetteur automatique (donnant, sous la forme d'une montre à contacts de haute précision, la seconde chronographique), le tope d'observation, la source de courant et tous autres menus accessoires tels que cordons souples, bande de papier de réserve en rouleaux, double décimètre, etc., — a été créé le type de poste représenté dans la figure 337.

C'est ainsi enfin qu'ont vu le jour des récepteurs chronographiques à 3, 4, 6 (et plus) traceurs, commandés par autant d'électro-aimants à circuits indépendants et permettant d'inscrire sur une seule et

même surface d'enregistrement, plusieurs phénomènes dont on a intérêt à pouvoir observer, simultanément ou successivement, les diverses phases (instants, durées, intensités, fréquences, etc.).

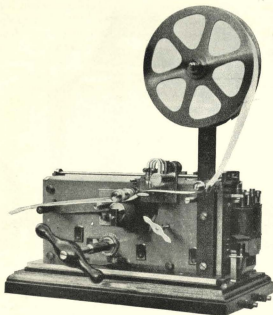


Fig. 336

Releveurs des indications chronographiques. — Nous avons vu à page 516, en regard de la figure 333, que la distance x qui sépare le commencement d'un signal *topé* k du commencement du signal de seconde le plus voisin d , doit être mesurée le plus exactement possible. Lorsque la seconde chronographique a la longueur de 10 mm couramment employée dans les observatoires, la durée que représente la distance x peut être facilement évaluée (relevée) en fractions de seconde, puisque 1 mm de longueur est égal à un dixième de seconde; un simple double décimètre gradué de demi en demi ou de quart en quart de millimètre, donnera même le vingtième, respectivement le quarantième de seconde.

Pour obtenir un relevé plus fin encore, on se servira avec avantage d'une plaque en verre transparent (fig. 338), gravée d'une part de 10 longs traits légèrement divergents tels que *ab*, *cd*, *ef*, etc.,

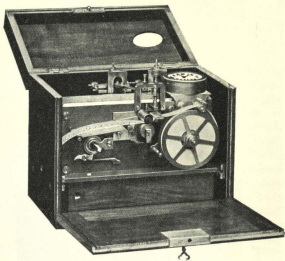


Fig. 337

et d'autre part de traits transversaux tels que 1, 2, 3, etc., disposés en 10 zones, et cela de telle façon que sur le trait transversal du milieu, le croisement avec lui des traits divergents corresponde là à

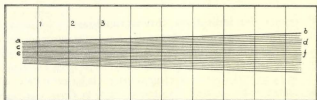


Fig. 338

une graduation millimétrique exacte. Cette plaque appelée « releveur Fuess », du nom de son inventeur, peut être appliquée et glissée commodément sur la bande à signaux, et en permet ainsi

le relevé rapide. La figure 339 représente un releveur Fuess dans son étui. Mais on peut pousser plus loin encore le fractionnement de la longueur de 10 mm de la seconde chronographique, en employant la machine micro-métrique que représente en perspective la figure 340 et qui est le résultat de la collaboration du célèbre astronome autrichien Oppolzer et de Hipp et Favarger. Cette machine permet, au moyen d'un jeu de leviers parallélogrammatiques (qui est renfermé entre deux plaques horizontales et dont on voit, vers la droite de la figure, le bou-

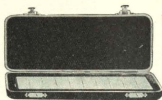


Fig. 339

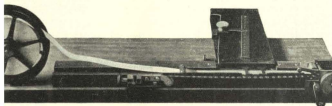


Fig. 340

ton blanc actionnant le curseur, et l'échelle graduée en demi-millimètres), d'amplifier au décuple la longueur correspondante parcourue par un index fin à cheveu qui se déplace au-dessus de la bande à relever, en même temps que le curseur à bouton manœuvré à la main. On arrive ainsi à apprécier commodément la valeur de x (fig. 333) en centièmes, respectivement en demi-centièmes de seconde.

Si l'on veut avoir un fractionnement encore plus fin de la seconde chronographique, [le millième par exemple, ou même le demi-millième de seconde, on emploiera un chronographe développant régulièrement 25 millimètres de bande par *quart* de seconde, longueur que la machine à relever divise facilement en 250, ou même en 500 parties... et ainsi de



Fig. 341

suite. La figure 341 fait voir quelle est la disposition que Hipp a donnée au releveur à cadran divisant en 100 parties la longueur de la seconde de 10 mm du chronographe à cylindre de la figure 332.

Services horaires d'un observatoire astronomique moderne.

Nous admettons ici que l'observatoire en cause devra être organisé de telle manière qu'on puisse faire de lui un centre général de distribution de l'heure exacte électriquement unifiée, étendant ou susceptible d'étendre sa zone d'action sur une surface terrestre ou maritime aussi grande que l'on voudra.

Ses divers services horaires doivent alors être assurés par deux groupes d'instruments, dont l'un, le plus important au point de vue de la détermination et de la conservation de l'heure astronomique proprement dite (service interne), est basé sur le *temps sidéral* et comprend les pendules fondamentales constituant les « garde-temps » de l'institut, et dont l'autre, le plus important au point de vue de la distribution de l'heure civile (service externe), est basé sur le *temps moyen*. Ce dernier groupe peut assurer en outre le service de contrôle de la marche des montres de précision transportables (chronomètres de marine, ou de bord, ou de poche) et des pendules de haute précision (non-transportables) dont l'observatoire est ordinairement chargé, lorsque la contrée qu'il dessert est un centre de fabrication de ces instruments horaires, ou bien un centre de navigation maritime.

Le dessin schématique de la planche VIII, emprunté aux archives de la maison Favarger & C^{ie}, de Neuchâtel, donne une idée des divers éléments qui constituent les deux groupes d'instruments que nous venons de définir, et des communications électriques qui les relient entre eux. La légende figurant sur la marge gauche de ce dessin donne déjà, à elle seule, des indications détaillées sur la nature, le but et le fonctionnement des divers appareils représentés. Nous compléterons ces indications par le texte descriptif suivant, en nous servant des notations et lettres de ladite planche VIII.

I. Centre horaire proprement dit.

a) Groupe des instruments dits « garde-temps ».

Ce groupe comprend tout d'abord les deux *pendules fondamentales A et B* réglées au *temps sidéral*¹. Dans le système Favarger & C^{ie} que nous décrivons ici et qui a été organisé par deux techniciens de cette maison, MM. Abegglen et Wälti, les pendules A et B sont identiques et du type Froment-Abegglen en vase clos, tel qu'il est représenté dans la figure 182 de la page 264.

Ces pendules synchronisent chacune l'un des deux *Relais pendulaires Ra et Rb* (p. 264 et 398) pourvus, d'une part, des contacts inverseurs à seconde qui les rendent capables d'actionner n'importe quel appareil électromagnétique secondaire et ici notam-

¹ On sait que le *temps sidéral* est mesuré par le retour d'une étoile donnée au même point du ciel, le *temps vrai* par le retour du centre du soleil à un même méridien (midi vrai), que la durée du *jour vrai* varie selon les saisons de l'année, que par contre la durée du *jour moyen* reste la même quelle que soit l'époque de l'année (le soleil *vrai* à allure variable ayant été conventionnellement remplacé par un soleil *fictif* à allure uniforme), qu'enfin le jour sidéral, qui correspond à une révolution de la terre sur elle-même considérée par rapport aux étoiles, est de 3^h56^m.54 plus court que le jour solaire moyen. Il résulte de ces diverses données que l'heure d'une pendule réglée au temps sidéral ne coïncide qu'une fois par an avec celle d'une pendule réglée au temps moyen, et qu'au cours d'une année sidérale, il y a exactement un jour sidéral de plus que de jours solaires au cours d'une année civile.

L'explication suivante empruntée à l'ouvrage (de feu Joseph Rambal, de Genève) intitulé: *Enseignement théorique de l'horlogerie*, fera saisir la cause de la différence de durée du jour sidéral et du jour solaire :

Soit T (fig. 342) notre globe terrestre; son mouvement diurne a lieu dans le sens de la flèche. Pour un habitant placé en *a*, il est midi parce que le soleil est situé en ce moment dans le plan méridien de *a*. Supposons que l'étoile *E* y passe en même temps. Quelle sera le lendemain la position respective des trois astres, lorsque notre globe aura accompli exactement une révolution sur lui-même? Considérant que, pendant ce temps, il aura fait aussi un certain trajet autour du soleil, il occupera une nouvelle position figurée par exemple en *T'*. Pour l'observateur placé en *a'*, l'étoile *E* passe au méridien parce qu'elle est à une distance si

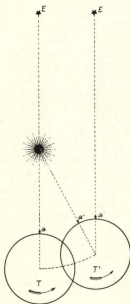


Fig. 342

ment, les deux compteurs électrochronométriques Cs^1 et Cs^2 battant la seconde sidérale, et, d'autre part, des cadrans avec aiguilles de secondes, de minutes et d'heures qui, actionnés mécaniquement par les tiges des balanciers de ces relais, comptent en les totalisant, les oscillations des balanciers des pendules A et B (p. 401).

Les deux compteurs Cs^1 et Cs^2 sont du type à armature polarisée oscillante de Hipp, qui assure au battement une netteté et une sonorité supérieures à celles de n'importe quelle autre espèce de compteur. Il va de soi que d'autres compteurs, de même type, peuvent être répartis en nombre quelconque dans toutes celles des salles de l'observatoire où l'heure sidérale est utile. Cs^1 est muni d'un contact interrupteur spécial xs qui a pour but de permettre le repérage de la 60^{me} seconde de chaque minute sidérale sur la bande de papier du chronographe enregistreur E .

Un permutateur Y , à lames croisées et à fiches mobiles, permet de relier le réseau des compteurs Cs et des autres appareils de temps sidéral qui en dépendent, avec l'un ou avec l'autre des deux systèmes $A - Ra$ et $B - Rb$. Les positions de ces fiches dessinées sur la planche VIII sont telles que c'est la pendule B , respectivement son relais pendulaire Rb , qui actionne les appareils secondaires du groupe sidéral, tandis que la pendule A et son relais Ra fonctionnent à vide. Deux interrupteurs bipolaires Ha et Hb permettent en outre de couper les deux fils reliant le contact-inverseur de chaque relais avec la source de courant générale I . Près du permutateur Y se trouvent encore deux appareils Is et Gs . Le premier, Is , est un inverseur qui permet, lorsqu'on presse alternativement avec le doigt ses deux touches, de remettre à l'heure les compteurs Cs quand, par suite d'une perturbation momentanée quelconque, ils sont en retard sur l'heure des relais pendulaires; le second, Gs , est un commutateur bipolaire qui doit être mis dans sa position de droite avant la mise en jeu de Is , si l'on veut que celle-ci influence effectivement les compteurs. Si ces derniers, au lieu d'être en retard, ont subi, toujours par accident, une avance, il suffit de mettre Gs dans sa

prodigieuse, qu'elle se trouve aussi bien dans le prolongement de la ligne $T'a'$ que dans celui de Ta . Mais il n'en est pas de même à l'égard du soleil, beaucoup plus rapproché de nous. L'instant du midi vrai n'arrivera que lorsque le point a' sera arrivé en a'' , c'est-à-dire comme nous l'avons vu, 3^m 56^s 54 plus tard*. Dans le cours d'une année astronomique, il y a exactement un jour sidéral de plus que le nombre de jours solaires.

* C'est la valeur que l'on obtiendrait en divisant le temps employé par la terre pour son mouvement diurne (24 heures = 1440 minutes) par le nombre de jours contenu dans l'année (365 $\frac{1}{4}$ environ).

position de droite pendant le nombre de secondes dont les compteurs *Cs* avancent, sans toucher à *Is*. En fonction normale, *Gs* est dans sa position de repos à gauche.

Les autres appareils supplémentaires non-mentionnés ci-dessus, mais marqués sur la planche VIII comme appartenant au groupe sidéral, seront décrits plus loin.

b) *Groupe des instruments du « temps moyen ».*

La pendule directrice *Pd*, réglée au temps moyen, est du même type que les « garde-temps » *A* et *B* du groupe sidéral ; elle synchronise également de la manière connue son relais pendulaire *Rpd*. Toutefois elle n'est pas organisée pour marcher en vase clos, mais est enfermée dans un cabinet vitré en bois poli, semblable à ceux des relais pendulaires. En outre, à proximité de son balancier se trouve un dispositif électromagnétique qui permet de remettre celui-ci à l'heure à un centième de seconde près, au moyen des contacts-interrupteurs *k* qui sont placés à l'extérieur du cabinet et dont l'un agit pour faire retarder, l'autre pour faire avancer, d'une quantité connue, le balancier de la directrice *Pd*, sans troubler son accord avec le relais *Rpd*. Ce dernier, les compteurs électrochronométriques *Cm1*, *Cm2*, *Cm3* et l'inverseur manuel de remise à l'heure *Im-Gm*, fonctionnent de la même façon que les instruments analogues *Ra* (ou *Rb*), *Is*, *Gs*, *Cs* du groupe sidéral. Par contre les compteurs *Cm*, qui battent tous la seconde de temps moyen, sont pourvus de contacts spéciaux dont nous donnerons plus loin la signification.

Les appareils marqués *Q1* et *Q2* sont des *frappeurs* (sounders) qui font entendre, avec une sonorité suffisante pour être perçus dans un très grand local, même bruyant, les coups secs du battement de la seconde de temps moyen ; un contact-interrupteur, placé à proximité, permet d'interrompre ou d'établir à volonté le jeu de l'un quelconque de ces frappeurs. Un contact automatique tel que *xm*, placé dans le compteur *Cm2*, intercepte la 60^{me} seconde de chaque minute pour tous les frappeurs, et cette seconde muette sert de point de repère pour compter les suivantes.

Il va de soi que des sounders peuvent aussi être branchés, si on le trouve utile pour raison d'économie, sur les fils ad-hoc du groupe sidéral et répartis en divers endroits pour donner là le battement de la seconde sidérale.

c) *Appareils horaires qui sont communs aux deux groupes*

a) et b) *ci-dessus.*

1^o **Sources de courant.** — Quatre batteries d'accumulateurs indépendantes les unes des autres fournissent les émissions de courant continu assurant la marche des services horaires. Chacune d'elles est double afin que, pendant la période de décharge de l'une des deux séries, la série jumelle puisse être révisée, entretenue ou chargée, puis rester en réserve jusqu'au moment d'être déchargée à son tour.

Chaque série de la batterie double marquée *I* sur la planche VIII consiste en 5 éléments intercalés en tension (10 volts) et assure alternativement avec l'autre série, le service général de toute l'installation horaire. Quant aux batteries *II*, *III* et *IV* qui alimentent exclusivement les électro-aimants moteurs des 3 pendules de précision *A*, *B*, et *Pd*, elles ont, dans chaque série, deux éléments en tension (4 volts). Les accumulateurs de la batterie *I* doivent avoir une capacité relativement élevée de 100 à 150 ampères-heures et ceux des batteries *II*, *III*, *IV*, de 40 ampères-heures.

Les appareils de charge des accumulateurs ne sont pas représentés sur notre planche VIII ; ils diffèrent selon que l'observatoire a à disposition du courant alternatif ou continu et selon le voltage de ceux-ci.

2^o **Chronographe-enregistreur.** — Il est représenté en *E* et comporte deux traceurs (à plumes ou à pointes sèches) commandés par les deux électro-aimants *1* et *2*.

L'enroulement de l'électro-aimant *2* peut être mis en circuit soit sur le réseau des compteurs *Cs*, soit sur celui des compteurs *Cm*, selon que le commutateur bipolaire *Ge* est placé (à la main) dans sa position de gauche ou dans celle de droite ; dans le premier cas, le traceur *2* inscrit sur la bande du chronographe la seconde de temps sidéral, dans le second cas, la seconde de temps moyen.

L'enroulement de l'électro-aimant *1* de *E* est relié avec les fils des *topes* d'observation ; les *topes* marqués *Ts* appartiennent au groupe du temps sidéral, les *topes* marqués *Tm* au groupe du temps moyen. Tous sont répartis à proximité des divers instruments (lunettes, pendules, compteurs, frappeurs, etc.), auprès desquels leur présence est utile.

La mise en marche et l'arrêt du rouage du chronographe-enregistreur peuvent avoir lieu soit mécaniquement à la main lorsque l'ob-

servateur qui se sert de E travaille dans son voisinage immédiat, soit à distance au moyen de la détente électromagnétique, dont on voit en 3 l'électro-aimant à armature polarisée (comparer avec page 518) ; dans le dernier cas, ce sont les topes à deux touches (l'une pour l'arrêt, l'autre pour la marche) marqués Vs , respectivement Vm , que l'observateur a à presser. Cette action à distance n'influence pas directement l'électro-aimant 3 de E , mais bien indirectement par l'intermédiaire du relais-inverseur F à deux positions et à deux électro-aimants.

Nous avons déjà vu plus haut que deux contacts-interrupteurs spéciaux xs et xm commandés soit par le compteur à seconde $Cs1$ du groupe sidéral, soit par le compteur $Cm2$ du groupe de temps moyen, avaient pour effet de *couper* sur la bande chronographique la 60^{me} seconde de chaque minute et de faciliter ainsi le comptage des secondes chronographiques qui sont dans le voisinage d'un ou de plusieurs signaux d'observation effectués au moyen des topes Ts ou Tm .

Remarquons enfin qu'en fermant le circuit de l'interrupteur bipolaire Ha sans ouvrir Hb , on peut obtenir l'enregistrement simultané de l'état des deux pendules fondamentales A et B , ce qui permet la comparaison facile de la *marche* qu'ont eue ces deux instruments pendant une période de temps donnée.

Il y a lieu d'insister ici sur le fait *très important* que la commande directe du traceur de la seconde chronographique par un relais pendulaire dont le balancier bat constamment et absolument à l'unisson avec celui d'une pendule fondamentale de très haute précision, et dont le contact-interrupteur est en outre placé à quelques centimètres seulement de l'axe de suspension de ce balancier, de manière à être ouvert et fermé à des moments précis et toujours identiques de sa course, que ce fait, disons-nous, assure une exactitude et une constance *parfaites* de la longueur de la seconde enregistrée sur la bande chronographique.

Nous avons en effet déjà vu ailleurs (voir notamment à p. 181) que lorsque le contact qui enregistre cette longueur est commandé, souvent encore à travers un relais électrique ordinaire (non pendulaire), par la roue d'échappement d'une pendule ou d'un chronomètre de marine, ou par tout autre mobile denté d'un train d'horlogerie, la seconde chronographique peut varier, en longueur, dans des proportions qui, lorsqu'il s'agit d'expériences de très haute précision, ne

sont pas négligeables. Le rapport de M. Beauvais, collaborateur aux mesures de longitudes qui ont été faites entre Paris et Washington, donne, sur ce point spécial, des renseignements très instructifs, à propos des résultats obtenus au moyen de la pendule de Riefler installée, il y a quelques années, à l'observatoire de Paris.

D'autre part, les comptes rendus des travaux présentés et discutés au Congrès international de chronométrie de 1900, à Paris, contiennent une étude très intéressante de M. Brillouin, maître de conférences à l'École normale supérieure, sur les irrégularités de marche qui résultent, dans un chronomètre de marine, de l'imperfection de ses rouages. M. Brillouin a constaté l'existence de ces irrégularités en observant par enregistrement photographique amplifié, les variations d'amplitude considérables que subissent continuellement les oscillations du balancier régulateur. Ces variations correspondent à tous les passages d'une dent quelconque d'un mobile quelconque, à tous les défauts de centrage des axes, à toutes les irrégularités de taille des dents, etc. Il n'y a pas deux oscillations consécutives qui aient la même amplitude ; or il est très douteux, pour ne pas dire impossible, que deux oscillations d'amplitude inégale aient même durée.

Il résulte de ce qui précède que le chronomètre de marine et, par analogie, tout autre mécanisme d'horlogerie, fixe ou transportable, à échappement lent et délicat, paraît bien capable de fixer un intervalle de temps de 24 heures à une petite fraction de seconde près, — c'est-à-dire au cent millième environ, les écarts qui ont lieu dans le sens de l'avance étant compensés par ceux ayant lieu dans le sens du retard, — mais que la même précision relative ne peut être obtenue pour une période de temps plus courte et notamment pas pour celle d'une seconde, ou de deux secondes consécutives.

A l'objection qui vient ici tout naturellement à l'esprit et selon laquelle le chronographe-enregistreur est forcément aussi sujet aux imperfections des dentures, pivots et autres organes mobiles, signalées tout à l'heure à propos des chronomètres de marine, et peut par conséquent fournir lui-même des marches irrégulières, nous croyons pouvoir opposer le raisonnement suivant :

Les variations d'amplitude du balancier régulateur observées par M. Brillouin sont dues, selon nous, autant à la trop faible ou trop lente puissance réglante de ce régulateur, qu'aux variations que subit la force du ressort-moteur du chronomètre en se transmettant du mobile le plus lent, d'abord aux mobiles plus rapides, et ensuite au balancier lui-même. Si, à chaque instant, disons à chaque centième

de seconde qui s'écoule, il y avait en tous les points de la chaîne des organes transmetteurs, *équilibre parfait* entre la force motrice d'un côté, et les résistances mécaniques agissant en sens inverse de l'autre côté, — la régularité de marche du mécanisme serait elle-même *parfaite*, et il serait alors superflu de compliquer ce mécanisme en lui adjoignant l'organe délicat et plus ou moins efficace auquel on a donné le nom de *régulateur*. Malheureusement, cet équilibre idéal n'existe jamais, étant donnée l'imperfection inévitable des machines et outils au moyen desquels sont exécutés les organes, étant donnée aussi l'instabilité moléculaire des matières qui composent ceux-ci ; constamment, l'un des deux facteurs antagonistes, soit la force, soit la résistance, est plus grand ou plus petit que l'autre et alors il a fallu nécessairement avoir recours, pour compenser ces écarts, ou même si possible les annuler, précisément à un régulateur.

Mais ce régulateur lui-même est plus ou moins parfait, selon qu'il est à action plus ou moins rapide, ou plus ou moins puissante. Lorsqu'il est *oscillant*, comme c'est le cas aussi bien avec le balancier à ressort spiral d'un chronomètre, qu'avec la lame vibrante d'un chronoscope ou d'un chronographe-enregistreur de Hipp, la rapidité de correction d'un écart momentané d'équilibre entre les deux facteurs antagonistes mentionnés ci-dessus, sera d'autant plus grande que la période d'oscillation du régulateur, sera elle-même plus *courte*. Or avec le balancier à spiral cette période varie de un cinquième à une demi-seconde, tandis qu'avec la lame vibrante elle est de cinq millièmes de seconde chez les chronographes et de un millième de seconde chez les chronoscopes ; il est bien évident dès lors que, dans cette dernière espèce d'appareils, la correction d'un écart d'équilibre plus ou moins grand, ou plus ou moins brusque, entre la force et les résistances, se fera beaucoup mieux que dans les divers cas où c'est un balancier à spiral qui sert de régulateur ; avec ce dernier, en effet, il s'écoulera au moins un cinquième de seconde avant que l'effet de la correction se produise, tandis que dans le cas de la lame vibrante, il s'écoulera tout au plus cinq millièmes de seconde. Il est bien évident, en outre, que plus la période du régulateur oscillant est courte, plus aussi est petit l'écart d'équilibre à corriger et plus aussi, par conséquent, est réduit le *travail* qu'a à effectuer le régulateur, pour opérer cette correction.

Nous ne pouvons entrer dans de plus longs développements sur cette question spéciale de la *puissance réglante* des régulateurs oscillants à très petite période, et nous nous contenterons de signaler

ici les deux faits suivants qui démontrent combien cette puissance est grande :

1^o Un chronographe de Hipp étant donné, on a pu faire varier, du simple au double, le poids moteur actionnant le rouage de cet instrument, sans que sa lame vibrante ait cessé de remplir sa fonction de régulateur, autrement dit, sans que la longueur de la seconde chronographique inscrite sur la bande par le contact-interrupteur d'une pendule de haute précision, en ait été modifiée (augmentée ou réduite).

2^o Les 4 paires d'aiguilles du chronoscope qui a été décrit à pages 507 et suivantes, mises en marche électromagnétiquement, en partant du zéro de tous les cadrans, puis arrêtées simultanément par la pression d'un tope unique, conservent leur accord au cours de leur marche, pendant plusieurs minutes, alors même que durant ce temps, la force motrice du ou des ressorts de barillets, a à entraîner, en plus du rouage principal réglé par la lame vibrante, les minuteriers des quatre paires de cadrans. Le nombre des axes, roues et pignons dentés en jeu, est ainsi cinq à six fois plus grand au total que dans les chronomètres de marine étudiés par M. Brillouin.

II. Centre horaire de distribution de l'heure civile.

Généralités. — Nous avons vu, aux chapitres V, VI et VII, comment l'heure exacte, déterminée dans un observatoire astronomique servant de centre horaire général, pouvait être transmise électriquement soit à des centres secondaires urbains, soit à un réseau de lignes de chemins de fer, de postes télégraphiques ou téléphoniques, soit enfin à des postes maritimes de ports ou de côtes. Le service horaire *extérieur* d'un observatoire moderne tel que celui dont nous avons esquissé sous I ci-dessus, l'organisation horaire *intérieure*, devra pouvoir satisfaire simultanément aux diverses méthodes de transmission que nous venons d'énumérer. Il devra en outre être pourvu des appareils spéciaux qui lui permettront d'expédier par les méthodes de la télégraphie sans fil (T. S. F.), les signaux horaires dont une station émettrice voisine, munie elle-même des appareils nécessaires, fournira les ondes radiotélégraphiques plus ou moins puissantes ou plus ou moins longues. Il n'est pas nécessaire, en effet, que les générateurs de ces ondes se trouvent dans le même bâtiment que les instruments plus délicats qui les distribuent selon des rythmes divers ; ces derniers instruments sont, le plus souvent, seuls installés dans le bâ-

timent de l'observatoire, à proximité des horloges-mères ou secondaires qui les commandent. Une ou deux lignes télégraphiques, soit aériennes, soit souterraines, suffisent alors à relier entre eux l'observatoire et le poste générateur des ondes. C'est ainsi qu'à Paris, par exemple, la station radiotélégraphique du Champ-de-Mars, avec la tour Eiffel comme porte-antenne, est commandée au moyen d'organes placés à l'observatoire de cette ville.

Voici comment sont disposés, dans l'observatoire de notre planche VIII, les divers groupes d'appareils distribuant, à l'extérieur, l'heure civile exacte :

- a) *Groupe des appareils expédiant des signaux horaires T. S. F. dits ordinaires selon le code international (ou tout autre code quelconque établi ou à établir).*

L'instrument principal de ce groupe est le *transmetteur de signaux* marqué *L*. Il est analogue au type déjà décrit en regard de la figure 316 et consiste en un robuste train d'horlogerie actionné par un poids et réglé par une lame vibrante de Hipp. L'organe essentiel de *L* est une roue à cames qui une fois enclenchée électromagnétiquement avec le train d'horlogerie, ouvre et ferme alternativement, selon le code admis, un contact-interrupteur. La succession des émissions de courant ainsi produites est régulière à quelques millièmes de seconde près.

C'est le compteur électrochronométrique *CmI* battant la seconde de temps moyen qui met en action, aux moments voulus, les deux électro-aimants du transmetteur *L*. Il le fait au moyen de deux contacts successifs qu'il ferme chacun, une fois par 24 heures (ou plus souvent si on le juge bon), pendant la durée d'une seconde environ. Le premier de ces contacts ferme le circuit de la batterie générale *I* sur l'électro-aimant de déclenchement du train d'horlogerie de *L*, et le second provoque l'enclenchement de la roue à cames avec le dit train.

Les émissions de courant produites par le contact-interrupteur de *L*, commandent un relais robuste *ZI* à contacts bipolaires et à nappe de mercure, qui peut à son tour livrer passage aux courants plus forts provenant de la station radiotélégraphique.¹

¹ Il va de soi qu'on tient compte, en fixant les instants précis où chaque contact-interrupteur est effectivement fermé, du *retard*, envisagé comme constant, qui est dû à l'inertie plus au moins grande des organes mécaniques ou électromagnétiques mis en jeu par ces contacts.

b) *Groupe des appareils expédiant par T. S. F. (ou par fil) des signaux horaires dits « scientifiques » ou « rythmés ».*

Les signaux T. S. F., « ordinaires » mentionnés sous a) ci-dessus, ont une précision relative qui ne dépasse guère le dixième de seconde. Elle suffit cependant dans la plupart des cas qui se présentent dans la vie civile. Son but principal est de mettre les navigateurs en état de déterminer leur position en longitude, opération qui nécessite, d'une part, la connaissance de l'heure du lieu et d'autre part, celle du méridien d'origine au même instant. L'heure du lieu se détermine par les observations astronomiques (en mer au moyen du sextant), celle du méridien d'origine par les chronomètres de bord réglés au départ sur l'heure directrice. Mais, ainsi que nous l'avons déjà vu à pages 475 et suivantes, l'heure ainsi conservée par les garde-temps des navires ne peut être utilisée avec profit que si elle est constamment contrôlée. Les signaux horaires T. S. F. ordinaires permettent de faire ce contrôle plusieurs fois par jour, à la seule condition que les navigateurs disposent à bord des appareils de réception voulus.

Lorsqu'il s'agit, par contre, d'opérations scientifiques exigeant une connaissance de l'heure exacte à plus de 0,1 sec. près, l'observatoire émetteur doit expédier des signaux horaires pouvant être reçus par la méthode des *coïncidences* (comparer avec page 393) qui permet une approximation pouvant aller jusqu'au centième de seconde. Telle est en effet la précision actuellement exigée et atteinte dans les opérations géodésiques ayant pour but, entre autres, de déterminer la différence de longitude existant entre deux points fixes de la surface terrestre. Cette précision est également exigée lorsqu'il s'agit de comparer entre eux les résultats de déterminations astronomiques de l'heure faites par plusieurs observatoires diversement situés.

Voici comment on a appliqué à Paris la méthode des coïncidences.

« Deux fois par jour, le matin vers 10 h. 30 et le soir vers 23 h., le poste de la tour Eiffel envoie 300 courtes émissions T. S. F. régulièrement espacées entre elles d'une seconde moins un cinquantième de seconde ; pour en faciliter le comptage à la réception, la dernière émission ou, mieux dit, le dernier battement de chaque minute est supprimé.

« Ces battements étant ainsi *plus courts* que la seconde, si on les écoute en même temps que ceux d'une horloge battant la seconde exacte, les premiers avanceront peu à peu sur les seconds jusqu'au

moment où se produira une *coïncidence*, c'est-à-dire jusqu'au moment où le battement du poste émetteur et celui de la pendule du poste récepteur seront à l'unisson. Cette coïncidence peut être observée cinq fois pendant la durée des 300 battements.

« L'opérateur qui veut vérifier l'état exact de sa pendule locale, compte le nombre de battements T. S. F. qui s'écoule entre le premier de ces battements et la première coïncidence ; il note en même temps l'heure locale qui existe au moment de cette coïncidence. Il procède de même aux moments des quatre autres coïncidences et en prenant la moyenne des résultats notés, il obtient à un cinquantième de seconde près, la quantité dont son garde-temps avance ou retarde sur le temps T. S. F. »¹

Sur notre planche VIII la pendule émettrice des battements rythmés se voit en *N*. Elle est exactement semblable à celle décrite à la page 393. Au repos, le balancier de la pendule *N* est retenu dans une position inclinée par un enclenchement électromagnétique. Au moment précis où l'électro-aimant de cet enclenchement est excité par la fermeture du contact de droite du compteur électrochronométrique *Cm2*, le balancier est libéré et oscille en fermant à chaque oscillation le contact interrupteur simple qui est placé près de la suspension et qui commande lui-même le relais à mercure *Zn* semblable au relais *Zl* du groupe précédent. Le relais *Zn* émet alors radiotélégraphiquement les émissions rythmées pouvant être reçues en n'importe quel point de la zone d'action de la station T. S. F.

c) *Groupe des appareils expédiant des signaux horaires par l'intermédiaire des lignes télégraphiques de l'État.*

Le problème résolu ici est analogue à celui que nous avons déjà traité au chapitre VII (p. 467). Un relais *O* placé à l'observatoire actionne à son tour un relais plus robuste ; ce dernier installé au poste central du réseau télégraphique national, opère la fermeture simultanée des relais de toutes les lignes télégraphiques principales qui doivent participer à la réception directe du signal d'heure. Cette fermeture peut avoir lieu au moyen des relais multiples décrits

¹ Le texte ci-dessus, placé entre guillemets, a été partiellement emprunté à l'excellent ouvrage de M. Joseph Roussel : *Le Livre de l'amateur de T. S. F.*, Paris, librairie Vuibert (1921).

en regard de la figure 313. Le relais *O* est commandé par le compteur électrochronométrique *Cm3* dont le contact correspondant, peut être fermé une ou plusieurs fois en 24 heures par l'armature polarisée de ce compteur. Comme cette armature bat la seconde de temps moyen on pourra expédier, autant de signaux directs ou indirects que l'on voudra et opérer des combinaisons quelconques pouvant faciliter le service de transmission (signaux d'avertissement, signaux horaires proprement dits durant une ou plusieurs secondes, signaux finals, etc.).

d) *Groupe des appareils expédiant des signaux horaires optiques.*

Les signaux optiques sont principalement à l'usage des navires stationnant dans les ports ou évoluant dans le voisinage des diverses côtes d'un pays maritime. A la fin de notre chapitre VII, nous avons décrit quelques dispositifs récepteurs de cette espèce de signaux (ballon tombant, sémaphores à jalousies). Ajoutons ici que l'extension toujours croissante qu'ont prise ou prennent encore dans tous les pays civilisés, les usines électriques de force et de lumière et leurs zones d'action, permet de donner aux signaux optiques destinés aux navigateurs le grand avantage de la visibilité nocturne. De là à l'idée d'envoyer à ceux-ci non pas seulement des signaux horaires proprement dits, espacés à plus ou moins longs intervalles, mais encore des signaux lumineux quelconques répétés aussi fréquemment qu'on le voudra, toutes les heures par exemple, il n'y a qu'un pas qui a été rapidement franchi.

L'instrument principal du présent groupe d) est un balancier *W* (pl. VIII) qui bat la demi-seconde et dont les oscillations sont entretenues et synchronisées par l'électro-aimant fixé au dessous de lui et branché sur le circuit des compteurs électrochronométriques *Cm* battant la seconde de temps moyen. Près de sa suspension ce balancier est muni d'un système de contacts-interrupteurs capable de livrer des émissions ou groupes d'émissions, variables à volonté en instants et en durées, mais qui peut aussi être organisé de manière à fournir, à chaque heure de la nuit par exemple, des signaux horaires lumineux rendus reconnaissables et distincts par la manière dont se succèdent les éclats et les éclipses de lampes électriques puissantes pouvant en outre être diversement colorées.

Les contacts de la suspension du balancier synchronisé *W* ferment le circuit de la batterie principale *I* sur un ou plusieurs relais

robustes tel que Z_w dont les circuits secondaires sont capables de supporter sans difficulté, soit les courants d'allumage des lampes-signaux, soit les courants T. S. F. de la station génératrice radiotélégraphique.

III. Considérations concernant la réception des signaux horaires émis par un observatoire tel que celui qui a été décrit sous I et II ci-dessus.

La connaissance de l'heure exacte était autrefois réservée à quelques établissements privilégiés : observatoires astronomiques, laboratoires d'universités ou de hautes écoles techniques, ports maritimes, manufactures de montres de précision, etc. Aujourd'hui, le développement intense du trafic et de l'activité industrielle, commerciale et agricole, exige que l'heure civile exacte soit connue de chacun. Le service horaire d'un observatoire moderne doit donc pouvoir étendre ses ramifications dans tous le pays, quelque étendu qu'il soit, dont il est le centre horaire général.

Par la télégraphie ordinaire on peut atteindre les villes, les villages et même les hameaux les plus éloignés ; nous avons vu que dans ce cas, un simple signal transmis une ou deux fois par jour à des instants connus permet de remettre à l'heure, manuellement, avec une exactitude suffisante, quelques régulateurs-garde-temps ayant une marche relativement bonne et qui, répartis dans un ou deux bâtiments publics (bureau de poste local, hôtel de ville ou de commune, etc.), peuvent, à leur tour, renseigner exactement le public qui les fréquente ou qui prend la peine d'aller les consulter.

D'autre part, l'extension croissante des réseaux téléphoniques publics et privés, permet aussi de mettre l'heure exacte à la portée de n'importe quel abonné, soit une fois par jour, à un instant prédéterminé, soit à n'importe quelle minute de la journée, sur demande spéciale.

Toutefois ces deux méthodes de distribution de l'heure civile, ne satisfont que d'une manière incomplète à la condition de *l'universalité* de cette distribution. Tout compte fait, elles n'atteignent que certaines catégories de personnes, car les abonnés au téléphone public, les employés des chemins de fer, des postes et des télégraphes, ceux des ports maritimes et en général toutes les personnes qui, en vertu de leurs occupations professionnelles, sont à même de connaître l'heure exacte mieux que la masse de la population, tous

ces *privilegiés* de l'heure, en un mot, constituent, additionnés, un total qui est très inférieur à celui de leurs concitoyens moins privilégiés. En outre, ces deux modes de distribution sont bien loin de remplir la seconde des conditions essentielles auxquelles tout système d'unification d'heure devrait satisfaire, à savoir celle d'une *permanente disponibilité*.

En fait, les conditions que nous venons de mentionner ne peuvent être satisfaites toutes deux que par le moyen de nombreux cadrans publics ou privés commandés par une ou plusieurs horloges-mères (primaires ou secondaires), réglées elles-mêmes par l'observatoire qui est leur centre général d'unification, en sorte que l'appareil horaire que nous avons désigné sous le nom de « *cadran secondaire* » est le seul que chacun puisse, à tout instant et sans aucune formalité ni perte de temps préalable, consulter du regard.

Et alors on arrive, une fois de plus, à cette conclusion déjà maintes fois formulée ici, qu'un réseau d'unification d'heure par compteurs électrochronométriques à armatures polarisées, constitue le système de distribution automatique de l'heure civile le plus économique et le plus parfait.

Voici en outre les diverses conditions accessoires auxquelles ce système satisfait (en dehors des deux conditions primordiales que nous venons de mentionner) :

1^o Il permet d'actionner des cadrans secondaires de toutes les grandeurs pratiques depuis 10 (ou même moins) centimètres de diamètre, jusqu'aux plus grandes horloges de fronton ou de clocher.

2^o Il permet d'étendre indéfiniment le nombre des cadrans unifiés.

3^o Il permet de desservir non pas seulement un nombre quelconque de cadrans de n'importe quelles dimensions, mais encore des appareils horaires très éloignés du centre général d'unification.

4^o Il permet de relier au réseau horaire, des cadrans *publics* qui, bien qu'exposés à toutes les intempéries (froid, chaud, vents, pluies, neige, poussière, courants atmosphériques, courants vagabonds, etc.) marchent, malgré tout, avec la plus grande sûreté.

5^o Il n'exige qu'un minimum d'intervention de la part des surveillants.

6^o Il permet de régler, par l'intermédiaire d'appareils horaires simples et robustes reliés au centre d'unification, toute l'activité interne de n'importe quel établissement (scientifique, industriel, commercial, agricole, administratif, scolaire, sanitaire, etc.), au moyen

de signaux automatiques quelconques (acoustiques, optiques, enregistrés, etc.) qui peuvent être établis, soit selon un ou plusieurs horaires fixés d'avance, à périodes quotidiennes, hebdomadaires, saisonnières, etc., soit selon des horaires variables à volonté.

7° L'exactitude de l'heure distribuée est, sur n'importe quel appareil horaire dépendant du centre d'unification et à n'importe quelle heure de la journée, de l'ordre d'une petite fraction de seconde. Ce résultat est notamment obtenu lorsqu'on emploie comme pendule centrale fondamentale commandant tout le système, un régulateur de haute précision dont l'écart moyen de marche diurne ne dépasse pas quelques centièmes de seconde et avec le balancier duquel battent synchroniquement tous les balanciers des horloges-mères secondaires.

8° Les horloges de tour existantes peuvent être, lorsque leurs mécanismes sont en bon état, facilement reliées au système général d'unification. Il est très important en effet que le principe de l'unification *absolue* une fois admis, il n'existe plus, nulle part, de cadrans publics non unifiés qui puissent induire en erreur les passants ; car un seul cadran montrant une heure autre que celle de l'horloge fondamentale, peut provoquer des erreurs regrettables, le fait seul de son existence suffisant à rendre suspects tous les appareils horaires unifiés avec lesquels il est lui-même en discordance.

9° Enfin, en utilisant les ondes hertziennes, on peut étendre indéfiniment un réseau d'unification d'heure et le rendre successivement urbain, régional, national, international et même continental, sans qu'aucun des avantages énumérés ci-dessus cesse d'être acquis (voir Chapitre X).

**Consacré plus spécialement
à l'électrochronométrie considérée dans ses rapports
avec la télégraphie sans fil.**

Nous avons vu, à pages 522 et suivantes, que parmi les divers services horaires externes de l'observatoire organisé selon le schéma de notre planche VIII, celui décrit aux paragraphes a) (p. 531) et b) (p. 532) emprunte les méthodes de la T. S. F. L'appareil automatique

L du groupe a) (p. 531) a en particulier pour but de transmettre les signaux horaires dits « ordinaires » selon le code adopté par la Commission internationale de l'heure (instituée à Paris en 1912 au cours d'une conférence de 16 États adhérents : Allemagne, Autriche, Belgique, Brésil, Espagne, États-Unis d'Amérique, France, Grande-Bretagne, Grèce, Italie, Monaco, Pays-Bas, Portugal, Russie, Suède et Suisse).

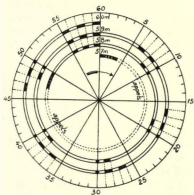


Fig. 343

La figure 343 donne le diagramme des signaux horaires adoptés par ladite Commission. Ces signaux sont distribués à partir de la cinquante-septième minute de l'heure précédant immédiatement l'heure convenue, et cela de la manière suivante :

De 57^m 0^s à 57^m 50^s, signaux d'avertissement.

De 57^m 55^s à 58^m 0^s, trois *traits* horaires d'une seconde, avec deux intervalles d'une seconde.

A 58^m 10^s, 58^m 20^s, 58^m 30^s, 58^m 40^s et 58^m 50^s, 5 *points* horaires précédés à intervalle d'une seconde, d'un *trait* d'une seconde.

De 58^m 55^s à 59^m 0^s, trois traits d'une seconde avec deux intervalles d'une seconde.

A 59^m 10^s, 59^m 20^s, 59^m 30^s, 59^m 40^s et 59^m 50^s, 5 *points* horaires précédés chacun de *deux traits* d'une seconde, présentant entre eux et avant le point, un intervalle d'une seconde.

De 59^m 55^s à 60^m 0^s, trois traits d'une seconde avec intervalle d'une seconde.

Ces mêmes signaux sont donnés à des heures différentes par une douzaine de stations émettrices réparties en divers endroits connus de telle façon qu'aucun point de la surface du globe terrestre ne soit privé de l'heure pendant plus d'une journée de 24 heures. Actuellement et jusqu'à nouvel ordre, ce service est réglé comme suit :

Stations émettrices

San-Fernando (Brésil)	2 heures
Arlington (États-Unis)	3 »
Mogadiscio (Somalie)	4 »
Tombouctou	6 »
Paris	10 »
Nauen	12 »
San-Fernando	16 »
Arlington	17 »
Massaouah (Érythrée)	18 »
San-Francisco	20 »
Nauen	24 »

Les heures données dans le tableau ci-dessus sont celles du dernier signal horaire envoyé par chaque station ; elles sont rapportées au temps moyen de Greenwich (fuseau 0 de l'Europe occidentale).

Dans la partie théorique du présent ouvrage, nous avons vu comment des signaux quelconques émis par un poste radiotélégraphique, peuvent être perçus par des postes récepteurs convenablement disposés. Il est bien évident que si les signaux émis sont ceux que nous avons appelés « horaires » et dont notre figure 343 donne le diagramme exact, la réception peut en être faite au moyen des mêmes appareils.

Les signaux horaires radiotélégraphiques sont, dans la plupart des cas, utilisés pour remettre à l'heure juste des pendules dites « garde-

temps » qui peuvent d'ailleurs être ou des horloges indépendantes ou des horloges-mères.

Lorsqu'on reçoit ces signaux au moyen d'un téléphone-écouteur (v. p. 149 et 152), ce dernier reproduit instantanément, à l'oreille, la succession exacte des traits et points du diagramme et alors l'opération de remise à l'heure de la pendule locale consiste à amener les battements de son balancier-régulateur à coïncider exactement avec les battements de même rang perçus à l'écouteur. Le plus souvent cette opération se fait à la main, l'opérateur remplissant ainsi le rôle d'un *relais humain*.

Mais elle peut aussi avoir lieu *automatiquement*, et alors le poste récepteur des ondes radiotélégraphiques devient, cela va de soi, plus compliqué.

Voici, rapidement exposée, la disposition brevetée qu'a adoptée M. l'ingénieur *Straumann* et dont nous avons déjà dit un mot dans la note qui se trouve au bas de la page 406.

La figure 344 donne une idée schématique des divers appareils constituant le poste de réception :

14 est l'extrémité inférieure du balancier de la pendule locale à synchroniser. Cette extrémité porte une traverse *15* qui est munie à droite d'une petite masse de fer doux et à gauche d'un doigt d'entraînement.

L'électro-aimant correcteur est visible en *13* ; on comprend immédiatement que ce sont les 2 pièces polaires *13a* qui, lorsque *13* est excité par un courant, influencent la masse de fer doux et par conséquent la durée d'oscillation du balancier *14*.

Le relais *I* qui est directement relié à un appareil récepteur radiotélégraphique dont nous indiquerons tout à l'heure la nature, est pourvu d'une armature oscillante qui bat synchroniquement avec les émissions de la Tour Eiffel aussitôt que le système est mis en position de réception, soit par le dispositif à contact *17* manipulé à la main, soit, plus logiquement, par un contact fermé automatiquement par la pendule locale elle-même ou par un compteur électrochronométrique à secondes dépendant d'elle. Cette position de réception n'est donnée, cela va de soi, que quelques secondes avant l'heure d'arrivée, connue d'avance, de la première émission radiotélégraphique ; cette heure est, selon le diagramme, 9 h. 57^m 0^s.

L'armature du relais *I* ferme, dès sa première oscillation, le contact 2. Le dispositif marqué *18*, *22* et *23* a pour but et pour effet de rapprocher ou d'éloigner une petite languette du doigt d'entraîne-

ment de la traverse 15 et par conséquent d'ouvrir et de fermer automatiquement le contact 18 à chaque oscillation de 14. La batterie locale + — alimente les circuits des électro-aimants 13, 16 et 23.

Voici quel est le fonctionnement de cet ensemble :

Dans la première phase qu'on peut appeler *phase de préparation des circuits*, le contact 17 est fermé par l'opérateur qui tire, pour cela, le fil à bouton attaché à l'extrémité gauche du levier 17a. Le contact 17 que le crochet de l'armature de l'électro-aimant 16, inactif à ce moment, maintient fermé, prépare le circuit principal de l'électro-

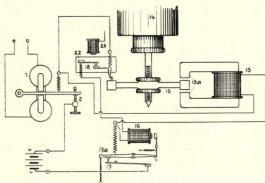


Fig. 344

aimant correcteur 13, circuit dans lequel le courant circulera aussitôt que le relais 1 entrera en activité. La fermeture du contact 17 a d'autre part pour effet d'envoyer le courant de la batterie locale dans une dérivation spéciale qui pour ne pas surcharger la figure, n'est pas dessinée. Cette dérivation comprend l'enroulement de l'électro-aimant 23, qui reste excité et attractif aussi longtemps que dure la fermeture du contact 17. L'armature de l'équipage mobile 22 et 18 est, pendant ce temps, maintenue attirée, ce qui a pour conséquence d'amener la languette pendante de cet équipage dans le plan d'oscillation du doigt d'entraînement de la traverse 15.

Il est bon de remarquer en passant que la languette et son contact 18 ont une disposition telle que la réaction qu'ils exercent par leur frottement réciproque, à chaque oscillation du pendule, ne peut perturber la marche de ce dernier, ce frottement ayant lieu au mo-

ment le plus favorable, celui où le balancier passe par la verticale, et où, par conséquent, sa vitesse est la plus grande. Cette fonction mécanique n'a d'ailleurs lieu que pendant quelques secondes et cesse automatiquement aussitôt la correction effectuée.

La seconde phase du cycle est celle au cours de laquelle se réalise la *correction proprement dite*: les émissions des signaux horaires T. S. F. en impressionnant le récepteur radiotélégraphique (qui n'est autre chose ici qu'un relais primaire sensible analogue à ceux mentionnés à la page 166 de notre exposé théorique), mettent en activité le relais 1; l'armature de celui-ci ferme le contact 2, boucle le circuit de la batterie locale sur l'électro-aimant 13, circuit qui est alors le suivant :

Batterie locale pôle —, contact 17 (fermé), électro-aimant 13, contact 2, et enfin batterie locale pôle +.

L'enroulement de 13 est alors parcouru par des courants intermittents réguliers dont le rythme est exactement celui des émissions T. S. F. elles-mêmes. Le champ magnétique pulsatoire, ainsi créé dans l'entrefer 13a, agit sur la masse de fer doux de la traverse 15 du pendule et ajoute à l'accélération terrestre g une accélération supplémentaire γ dont l'intensité dépend du voltage de la pile locale et de l'enroulement de l'électro-aimant 13.

La durée d'oscillation du pendule s'exprime alors par l'équation suivante :

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

l étant la longueur du pendule mathématique correspondant au pendule matériel 14.

Il résulte de ce qui précède qu'à chacune de ces oscillations ce pendule 14 prend une légère avance tant et aussi longtemps que l'accélération supplémentaire γ subsiste. Mais celle-ci disparaît ainsi que nous allons le voir, aussitôt que les battements du balancier 14 sont devenus synchrones avec ceux des signaux T. S. F., autrement dit, avec les battements de la pendule directrice du centre des émissions horaires radiotélégraphiques.

Ce mode de correction implique le réglage de la pendule locale sur un *retard* dont la valeur, très faible lorsque cette pendule est de haute précision, doit être légèrement supérieure à l'écart diurne maximum que puisse subir cet instrument en marche normale.

La troisième phase du cycle peut être dénommée : *mise au repos*

des organes correcteurs. Malgré la fermeture régulière, toutes les deux secondes, du contact 18, par l'action réciproque du doigt d'entraînement et de la languette pendante, ce contact ne livre passage à aucun courant, parce que chaque fois que 18 commence à se fermer, le contact 2 du relais 1, qui est en série avec lui, est déjà ouvert. Mais au moment où la correction du retard du balancier 14 est terminée, une coïncidence s'établit entre la fermeture de 18 et celle de 2 ; autrement dit le contact 18 boucle le circuit *avant* que la rupture du contact 2 ait lieu. Pendant le court instant de cette coïncidence, le courant de la batterie locale est lancé dans l'électro-aimant 16 par le circuit suivant :

Batterie pôle —, contact 17, électro-aimant 16, contact 18, contact 2 et enfin batterie pôle +.

L'électro-aimant 16 devenu actif, attire son armature, déclanche le levier du contact 17 et coupe ainsi tous les circuits locaux. L'équipage mobile 22 s'efface et dès lors le pendule 14 oscille librement, la languette ayant cessé d'être touchée par le doigt d'entraînement.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
PRÉFACES des 1 ^{re} , 2 ^{me} et 3 ^{me} éditions françaises	9 à 13

PARTIE THÉORIQUE

CHAPITRE PREMIER. — Généralités	15
Sources d'électricité	16
Électricités positive et négative	16
L'électricité à l'état de charge et de courant	17
Les volts, les ohms, les ampères, les coulombs	19
Les joules, les farads, les watts	21 à 25
La pile de Volta	25
Différents groupements des éléments de pile	28
La résistance électrique des circuits simples	31
La résistance électrique des circuits dérivés	33
Tableau des résistances spécifiques des métaux	35
CHAPITRE II. — Mesure des grandeurs.	
Généralités	36
1 ^o Exposé du système C. G. S.	37
Unités fondamentales et dérivées (géométriques et mécaniques)	37 à 38
2 ^o Unités dérivées électriques et magnétiques	39
Lois de Coulomb et de Laplace	40
Unités C. G. S. pratiques	42
Multiples et sous-multiples décimaux des unités	45
3 ^o Instruments et méthodes de mesure.	45
Galvanomètre. Boussole télégraphique suisse	45
Galvanomètre différentiel	47
Mesures des résistances :	48
par la méthode de substitution	50
» du galvanomètre différentiel	50
» du pont de Wheatstone	51
Mesure de la résistance intérieure des piles	52
» des forces électromotrices	53
» des intensités	56

	Pages
Ampèremètres, voltmètres, ohmmètres, etc.	56
Galvanomètre à miroir	56
» balistique	56
Étalons de force électromotrice et de capacité	57
Potentiomètres	57
CHAPITRE III. — Électrochimie.	59
1° Piles hydroélectriques primaires.	59
Polarisation et dépolarisation	60
Piles constantes à dépolarisants liquides	61
» » solides	63
Piles sèches	64
2° Électrolyse	64
Voltamètre	64
Lois de l'électrolyse	65
Équivalents chimiques et électrochimiques	65
Anode soluble	68
Galvanoplastie	68
Préparation de certains corps par voie électrochimique	69
3° Accumulateurs ou piles secondaires	69
Charge et décharge des accumulateurs	69
Voltage, capacité et rendement des accumulateurs	71
Redresseurs du courant de charge quand il est alternatif	73
Convertisseur rotatif	73
Soupape électrolytique, type Nodon	74
» électromagnétique	76
Redresseur à vapeur de mercure	78
CHAPITRE IV. — Phénomènes magnétiques et électromagnétiques. —	
Induction	80
1° Magnétisme et électromagnétisme	80
Généralités sur les aimants et les pôles magnétiques	80
Fantôme et champ magnétique	81
Intensité d'un champ magnétique	81
Champ magnétique terrestre	82
Flux de force magnétique	82
Induction magnétique	83
Moment d'un aimant	83
Intensité d'aimantation	84
Aimantation par influence et magnétisme temporaire	84
Corps magnétiques et diamagnétiques	85
Susceptibilité et perméabilité	85
Courbes d'aimantation	87
Hystérésis	87
Champ magnétique produit par un courant électrique	89
Solénoïde	90
Flux d'induction d'un solénoïde	91
Force magnétomotrice et reluctance	92
Solénoïde annulaire	93

	Pages
Solénoïde à noyau de fer doux	94
Induction magnétique et coefficients de perméabilité	95
Électro-aimants	96
Noyau d'électro-aimant non-homogène	99
Dispersion magnétique	100
Force portante des électro-aimants	101
Exemple de calcul d'un électro-aimant de force portante donnée	102
L'électro-aimant en horlogerie électrique	106
Solénoïdes à plongeurs (cylindriques, coniques, polarisés, pendulaires, etc.)	112
2° Phénomènes d'induction	117
Force électromotrice d'induction	119
La découverte de l'induction par Faraday	119
Les générateurs mécaniques d'électricité et les moteurs industriels	120
La bobine de Ruhmkorff	121
Self-induction et bobines anti-inductives	121
Coefficients de self-induction	122
Extra-courants	123
Constante de temps et latence	126
Courants de Foucault	127
3° Courants alternés et alternatifs	128
Période, amplitude, fréquence	128
Ondes alternatives amorties et entretenues	129
CHAPITRE V. — 1° Condensation de l'électricité	131
Condensateurs électriques (charge, décharge, capacité, diélectriques).	131
Pouvoirs inducteurs spécifiques des diélectriques	133
Différents groupements des condensateurs	134
Énergie absorbée et restituée par un condensateur	134
2° Électrostatique	137
Unités électrostatiques	137
Leurs valeurs en unités pratiques et électromagnétiques	139
CHAPITRE VI. — Les ondes électromagnétiques ou hertziennes.	140
Généralités sur les oscillations électriques	140
Courants de hautes fréquences	141
Dispositif de Tesla (éclateur)	141
Excitateur et résonnateur de Hertz	142
Vitesse de propagation des ondes électromagnétiques identique à celle des ondes lumineuses	143
Ondes hertziennes amorties et entretenues	143
CHAPITRE VII. — Télégraphie et téléphonie sans fil	145
Poste d'émission (antenne, éclateur, manipulateur expéditeur des trains d'ondes sous la forme de traits et de points du code télégraphique Morse, etc.)	145

	Pages
Poste émetteur de la Tour Eiffel et de l'Observatoire de Paris	146
Poste T. S. F. de réception (antenne réceptrice, accord et résonance, self et condensateurs de réglage, etc.)	147
Poste de réception à téléphone-écouteur	149
Détecteurs divers (à cristal, électrolytique, à valve)	150
Montage d'un poste récepteur en <i>Oudin</i>	153
Montage d'un poste récepteur en <i>Tesla</i>	155
Poste de réception T. S. F. avec enregistreur Morse et tube de Branly	155
La T. S. F. par lampes	156
Lampes à trois électrodes (amplificatrices, détectrices, émettrices, en hétérodynes, etc.)	156
Cadres remplaçant les antennes réceptrices	163
Téléphonie sans fil pour la transmission des sons et de la voix articulée	164
Inscription des signaux télégraphiques Morse reçus par T. S. F.	164
Relais primaires et secondaires pour postes de réception T. S. F. destinés à produire des effets mécaniques	166

PARTIE PRATIQUE

Introduction	167
CHAPITRE PREMIER. — Classification générale	168
CHAPITRE II. — Horloges électriques indépendantes	171
A. Horloges électriques indépendantes à remontoir	173
Généralités et sous-classification	173
a_1) Horloges électriques à remontoir par électro-aimant chez lesquelles l'organe remonté est un poids	177
Pendule à remontoir de Riefler	177
Horloge à remontoir de la Société Normal-Zeit	181
Horloge à remontoir avec sonnerie de la maison Favarger & C ^{ie}	183
Horloge à remontoir de Cohen	189
» » de Wagner	190
a_2) Horloges électriques à remontoir par électro-aimant chez lesquelles l'organe remonté est un ressort	191
Généralités	191
Horloge à remontoir David Perret	192
» » Aron	195
b_1) Horloges électriques à remontoir par moteurs rotatifs à marche intermittente	199
Généralités	199
Horloge à remontoir de Bohmeyer	200
» » de Ferdinand Schneider	201
Application du remontoir électrique aux horloges de clochers	205
Généralités	205

Système Château	207
» Favarger & C ^{ie}	208
» J. et A. Ungerer	209
» Weiss	212
<i>b</i> ₂) Horloges électriques à remontoir par moteur rotatif à marche continue	215
Généralités	215
Horloge Thury	215
» Warren	218
Horloges à moteurs des compteurs d'énergie électrique	221
Généralités	221
Horloge à tarif multiple de la Ville de Neuchâtel, type Martenet	225
B₁ Horloges électriques indépendantes à réactions directes	231
Rapide coup d'œil historique	231
Horloges à palette et contre-palette de Hipp	232
Pendule de haute précision de Hipp	238
Horloge à réaction directe de Bohmeyer	246
» » » de Lemoine	247
Pendule à restitution constante de Féry	248
Horloge de Féry sans lien matériel	250
Pendules de Grégory et de Lippmann	252
Pendule à frein électromagnétique de Favarger	254
» de Féry à rochet	258
» de la Société Brillié frères	259
B₂ Horloges électriques indépendantes à réactions indirectes	260
Généralités et sous-classification	260
<i>a</i> ₁) Horloges indépendantes à réactions indirectes dans lesquelles l'organe impulseur est un poids qu'actionne un électro-aimant ordinaire à courants toujours de même sens	261
Pendule de Froment	261
» de Favarger & C ^{ie} (type Froment-Abegglen)	264
<i>a</i> ₂) Horloges indépendantes à réactions indirectes dans lesquelles l'organe impulseur est un poids qu'actionne un électro-aimant à armature polarisée	265
<i>b</i> ₁) Horloges indépendantes à réactions indirectes dans lesquelles l'organe impulseur est le ressort de suspension du pendule sur lequel réagit l'armature d'un électro-aimant à émissions de courant toujours de même sens	265
Horloge de Joly	265
» de Siemens-Schuckert	267
<i>b</i> ₂) Horloges indépendantes à réactions indirectes dans lesquelles l'organe impulseur est le ressort de suspension du pendule sur lequel réagit l'armature d'un électro-aimant polarisé à émissions de courant alternativement renversées	268
Pendule de Irk	268
» de Baumann	269

	Pages
Compteur Favarger (pour grands cadrans)	324
» Denner	326
B. Horloges secondaires à déclanchement électrique	328
Généralités	328
Déclancheurs divers	330
Séries de déclancheurs en partie électriques et en partie mécaniques	333
Horloges électriques secondaires à mouvements d'horlogerie	334
Horloges de clochers à déclanchement électrique	336
Système Hipp à armature polarisée	337
C. Horloges électriques secondaires dans lesquelles le courant de l'horloge-mère agit comme correcteur	339
C ₁ par remise à l'heure	339
C ₂ par synchronisation des pendules	342
CHAPITRE IV. — Horloges-mères	347
Généralités	347
Discussion des moyens propres à augmenter la capacité d'une horloge-mère	348
Fractionnement des horloges secondaires en plusieurs grou- pes, etc.	348
La capacité d'une centrale horaire de distribution électrique de l'heure est indéfiniment extensible	352
Horloges-mères électriques à palette de Hipp	354
» à palette de Hipp à grandes capacités	357
Horloge-mère mécanique à déclanchement de Hipp (primitive et perfectionnée)	360
Autres types d'horloges-mères à déclanchement mécanique	376
Système Hipp à contacts frottants	376
Horloge-mère, système Grau	377
» » Siemens & Halske	377
Les horloges de clochers employées comme horloges-mères	378
Horloges-mères pour compteurs à armatures non-polarisées	378
Horloges-mères avec relais interposés entre elles et leurs horloges secondaires	379
Horloges-mères à courants d'induction de la Société Magneta	382
Horloges-mères pour vaisseaux	386
Emploi du compteur électrochronométrique comme horloge- mère	389
CHAPITRE V. — Maintien à l'heure des horloges-mères	391
Généralités	391
Système non-automatique (horloge à coïncidences de Hipp)	392
Système par remise à l'heure	393
Système par synchronisation	395
Relais pendulaire de la maison Favarger & C ^{ie}	398
Système mixte	402

	Pages
CHAPITRE VI. — Description de quelques systèmes plus ou moins étendus d'heure électriquement unifiée	408
A. Système dont le centre général est l'Observatoire de Neuchâtel	408
a) Centre général	410
b) Centre secondaire de Neuchâtel-Ville	412
Centre secondaire perfectionné par Favarger & C ^{ie}	417
B. Système d'unification de l'heure civile selon le type de la Société Normal-Zeit	419
C. Système d'unification de l'heure civile selon le type de la maison Favarger & C ^{ie} , par remise à l'heure des horloges-mères secondaires	427
I et II. Centrale urbaine	428
III. Postes d'horloges-mères secondaires	430
IV. Réseau des appareils horaires dépendant directement d'un poste d'horloge-mère secondaire	434
V. Circuits locaux commandés par les contacts horaires d'un cadran secondaire voisin	435
Signaux périodiques	436
Réveil-matin	437
Distribution des heures sonnées	438
D. Système d'unification de l'heure civile selon un autre type de la maison Favarger & C ^{ie} dans lequel les horloges-mères secondaires sont maintenues automatiquement à l'heure par voie de synchronisation	439
E. Système de distribution électrique de l'heure civile appliqué ou en voie d'application dans la ville de Paris	442
F. Système de distribution électrique de l'heure civile de la maison Siemens & Halske	446
G. Système de distribution électrique de l'heure de la Faculté des Sciences de Marseille	448
H. Appareils à signaux horaires automatiques	453
I. Systèmes d'unification électrique de l'heure civile applicables à des lignes de chemins de fer	462
CHAPITRE VII. — Transmission de l'heure exacte à de grandes distances par les lignes télégraphiques de l'État. Signaux horaires dans les ports ou sur les côtes de la mer	467
Généralités	467
Système Normal-Zeit et Siemens-Halske appliqué sur le réseau des chemins de fer de l'État allemand	468
Signaux horaires téléphoniques	473
Signaux horaires destinés aux navires	474
Système à ballon tombant du Port de Brême et des États-Unis	476
Signaux français à jalousies	478

CHAPITRE VIII. — Renseignements pratiques concernant un réseau public d'horloges électriques	481
Généralités	481
Études préliminaires	482
Calcul du voltage et de la capacité du générateur de courant	484
Horloges secondaires, appareils de la centrale horaire, réseau des fils, etc.	489
Contrôle et mise en marche du réseau	490
Surveillance et entretien du réseau	493
Recherche et correction des défauts	495
CHAPITRE IX. — Les applications scientifiques de l'électrochronométrie	500
Généralités	500
Chronoscopes et chronographes. Régulateur à lame vibrante de Hipp	502
Le chronoscope de Hipp	504
Chronoscope multiple à plusieurs paires de cadrans de la maison Favarger & C ^{ie}	507
Emploi du chronoscope multiple pour le repérage par le son des canons ennemis	510
Chronographes enregistreurs	512
Généralités	512
Chronographe à cylindre de Hipp	515
Chronographes à bande de Hipp	517
Releveurs des indications chronographiques	519
Services horaires d'un observatoire astronomique moderne	522
Généralités	522
I. Centre horaire proprement dit	523
a) Groupe des instruments garde-temps.	523
b) Groupe des instruments du temps moyen	525
c) Appareils horaires communs aux deux groupes a) et b).	526
1. Sources de courant	526
2. Chronographe enregistreur.	526
La grande puissance réglante de la lame vibrante de Hipp	527
II. Centre horaire de distribution de l'heure civile	530
Généralités	530
a) Groupe des appareils expédiant des signaux horaires T. S. F. dits « ordinaires ».	531
b) Groupe des appareils expédiant des signaux horaires T. S. F. dits « scientifiques » ou « rythmés ».	532
c) Groupe des appareils expédiant des signaux horaires par l'intermédiaire des lignes télégraphiques de l'État	533
d) Groupe des appareils expédiant des signaux horaires optiques (lumineux la nuit)	534
III. Considérations concernant la réception des signaux horaires émis par un observatoire tel que celui qui a été décrit sous I et II ci-dessus	535

	Pages
CHAPITRE X. — Consacré plus spécialement à l'électrochronométrie considérée dans ses rapports avec la T. S. F.	538
Les signaux horaires T. S. F.	538
Liste des grandes stations émettrices de signaux horaires avec indication des instants quotidiens de leur activité . . .	539
Emploi des signaux horaires T. S. F. pour la remise à l'heure non-automatique des pendules « garde-temps »	540
Maintien à l'heure (automatique) des horloges-mères secon- daires par les signaux horaires T. S. F. (système Straumann)	540

BIBLIOGRAPHIE

Liste chronologique des principaux livres et opuscules que l'auteur du présent volume a consultés ou cités au cours de son travail et qu'il signale à l'attention de ceux de ses lecteurs qui désireraient compléter leur documentation en électricité générale ou en électrochronométrie.

Traité d'Électricité théorique et appliquée, par A. DE LA RIVE. — J.-B. Baillière, Paris, 1854-1858.

Exposé des applications de l'Électricité, par le C^{te} Th. DU MONCEL. — Eug. Lacroix, Paris, 1872-1878.

Die elektrischen Uhren, von D^r H. SCHNEEBELL. — Orell-Füssli & C^o, Zürich, 1878.

Les mesures électriques, propositions en vue du prochain Congrès des électriciens, par T. ROTHEN, directeur-adjoint des Télégraphes suisses. — Rieder et Simmen, Berne, 1881.

Die elektrischen Uhren, in allgemein verständlicher Darstellung, für Uhrmacher, Elektrotechniker, Mechaniker, Ingenieure und das gebildete Publikum, von A. MERLING. — Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1884.

La Pendule électrique de précision de Hipp, par le D^r HIRSCH, Neuchâtel, 1884-1889.

Cours d'électricité industrielle, par A. PALAZ, professeur à l'Université de Lausanne. — F. Rouge, Lausanne, 1892.

Die Präzisions-Uhren mit vollkommen freiem Echappement und neuem Quecksilber-Compensationspendel, von S. RIEFLER. — München, C. Wolf & Sohn, 1894.

La Synchronisation électromagnétique, par A. CORNU, membre de l'Institut ; conférence faite devant la Société internationale des électriciens, en 1894.

L'Électro-aimant et l'Électro-mécanique, par SILVANUS-P. THOMPSON, traduction française par E. Boistel. — J. Fritsch, Paris, 1895.

L'Horlogerie électrique à l'Exposition universelle de 1900, par P. DECRESSAIN. — Revue chronométrique, Paris.

Horloge électrique système R. Thury, par H. CUÉNOD, ingénieur-construc-teur. Genève.

- L'Électricité industrielle*, par M.-C. LEBLOIS. — Ch. Delagrave, Paris, 1901.
- Comptes rendus des travaux du Congrès international de chronométrie à l'Exposition universelle de 1900.* — Gauthier-Villars, Paris.
- La Télégraphie sans Fil*, par le prof. D. MAZOTTO, traduit de l'italien par J.-A. MONTPELLIER. — V^{ie} Ch. Dunod, Paris, 1905.
- Horloges-mères et Installations horaires*, par Ch. PONCET, directeur de l'École Nationale d'Horlogerie de Cluses.
- L'Heure à Paris*, par Jean MASCART, astronome-adjoint à l'Observatoire de Paris. — Gauthier-Villars, Paris, 1907.
- Präzisions-Pendeluhrn und Zeitdienstanlagen für Sternwarten*, von Dr S. RIEFLER. — Theodor Ackermann, München, 1907.
- Cours élémentaire de Physique*, par M. CHASSAGNY. — Hachette & C^{ie}, Paris, 1907.
- État actuel de la Science électrique*, par DEVAUX-CHARBONNEL, ingénieur des Télégraphes. — H. Dunod et E. Pinat, Paris, 1907.
- Elektrotechnik für Uhrmacher*, von Johannes ZACHARIAS, Ingenieur. — Carl Marfels, A. G., Berlin, 1908.
- Formulaire de l'Électricien et du Mécanicien*, par E. HOSPITALIER et G. ROUX, 22^{me} édition. — Masson & C^{ie}, Paris, 1908.
- Die elektrischen Uhren*, von Dr A. TOBLER, zweite Auflage, bearbeitet von Johannes Zacharias, Ingenieur. — Hartleben, Wien und Leipzig, 1909.
- Initiation de l'Horloger à l'Électricité et à ses applications*, par Albert BERNER. — Inventions-Revue, La Chaux-de-Fonds, 1910.
- Le Génie civil*, nos d'août et 3 septembre 1910 : « L'Horlogerie électrique », par M. BÉACHE.
- Initiation à la Mécanique*, par Ch.-Ed. GUILLAUME. — Hachette & C^{ie}, Paris, 1912.
- Hilfsbuch für Elektropraktiker*, bearbeitet von C. ERFURTH und B. KÖNIGSMANN, 1^{er} Band : Schwachstrom, vierzehnte Auflage. — Hachmeister und Thal, Leipzig, 1913.
- Rapports techniques de l'Exposition Nationale Suisse de 1914 à Berne.* — Orell-Füssli, 1914.
- Die elektrischen Uhren*, par Gust. KRUMM. Ce volume fait partie de la série constituant la traduction et l'adaptation en allemand du grand « Traité d'Horlogerie moderne » de Claudius Saunier. — Hübners Verlag, Bautzen.
- Bibliothèque scientifique de l'Ingénieur et du Physicien*, par H. BOVASSE, professeur à la Faculté des Sciences de Toulouse : a) Cours de Magnétisme et d'Électricité, 2^{me} édit. ; b) Pendule, Spiral, Diapason, 2 volumes. — Delagrave, Paris.
- Histoire de la Pendulerie Neuchâteloise*, par Alf. CHAPUIS et divers collaborateurs. — Attinger Frères, Paris et Neuchâtel, 1917.

- L'Électricité à la portée de tout le monde*, par Georges CLAUDE, 8^{me} édition. — H. Dunod & E. Pinat, Paris, 1919.
- La T. S. F. par les Tubes à vide*, par Pierre LOUIS, ingénieur. — Vuibert, Paris, 1920.
- Le Livre de l'Amateur de T. S. F.*, par Joseph ROUSSEL, secrétaire général de la Société française d'étude de Télégraphie et de Téléphonie sans fil. — Vuibert, Paris, 1921.
- Agendas de l'Horloger*. — Magron, éditeur à Bienne.
- Nouveautés en Électrochronométrie*, par A. WAELTL. — Magron, Bienne, 1921.
- La Compensation des Horloges et des Montres*, procédés nouveaux fondés sur l'emploi des aciers au nickel, par Ch.-Ed. GUILLAUME, directeur du Bureau International des Poids et Mesures. — Éditions Forum, Neuchâtel, Genève et Paris.
- La France Horlogère*, n° du 15 juin 1921 : « Nouvelle Pendule électrique », par Ch. PONCET, directeur de l'École Nationale d'Horlogerie de Cluses. — Paris et Besançon, 1921.
- Revue générale de l'électricité* (organe de l'Union des Syndicats de l'électricité), Paris 1922-1923 : « Les progrès récents de l'Horlogerie électrique », par Marius Lavet, ingénieur (numéros de décembre 1922 de ladite Revue).

Diagramme général d'un centre horaire d'Observatoire astronomique avec groupe chronométrique au temps sidéral, groupe au temps moyen et service de distribution de l'heure astronomique et civile.

LÉGENDE

1. Groupe horaire temps sidéral.

- a. Pendule fondamentale (garde-temps) sous pression constante.
- b. Pendule fondamentale (garde-temps) sous pression constante.
- c. Relais pendulaire du garde-temps A.
- d. Relais pendulaire du garde-temps B.
- e. Compteurs électrochronométriques battant la seconde sidérale.
- f. Commutateur des relais pendulaires.
- g. Commutateur du circuit des compteurs.
- h. Clef d'inversion pour la remise à l'heure des compteurs.
- i. Interrupteurs bipolaires des relais pendulaires.
- j. Clefs de contact d'observations.
- k. Clefs de contact doubles de mise en marche et d'arrêt du chronographe enregistreur E.
- l. Interrupteur de la 60^{me} seconde chronographique (compteur Cs1).

2. Groupe horaire temps moyen.

- a. Pendule directrice en cabinet.
- b. Relais pendulaire de Pd.
- c. 3. Compteurs électrochronométriques battant la seconde de temps moyen.
- d. Commutateur du circuit des compteurs.
- e. Clef d'inversion pour la remise à l'heure des compteurs.
- f. 3. Clefs de contact d'observations.
- g. 3. Clefs de contact doubles de mise en marche et d'arrêt du chronographe E.
- h. Clefs de contact de correction de la pendule Pd.
- i. Émetteur de signaux.
- j. Relais avec contacts pour fortes intensités (actionné par I).
- k. Pendule de coïncidences avec contact d'émissions.
- l. Relais pour fortes intensités (actionné par N).
- m. Relais télégraphique type renforcé.
- n. Pendule synchronisée battant la 1/2 seconde avec contacts à combinaisons diverses.
- o. Relais pour fortes intensités (actionné par W).
- p. Interrupteur de la 60^{me} seconde chronographique (compteur Cm2).
- q. 2. Récepteurs acoustiques (sounders) battant la seconde de temps moyen.

Appareils communs aux deux groupes.

- a. Chronographe enregistreur à 2 tracés et à détente électrique.
- b. Relais double de mise en marche et d'arrêt à distance dudit chronographe.
- c. Commutateur du circuit chronographique.
- d. 2 batteries générales (de 10 volts chacune).
- e. 2 batteries circuit de la pendule fondamentale A (de 1 volts chacune).
- f. 2 batteries circuit de la pendule fondamentale B (de 4 volts chacune).
- g. 2 batteries circuit de la pendule directrice Pd (de 1 volts chacune).

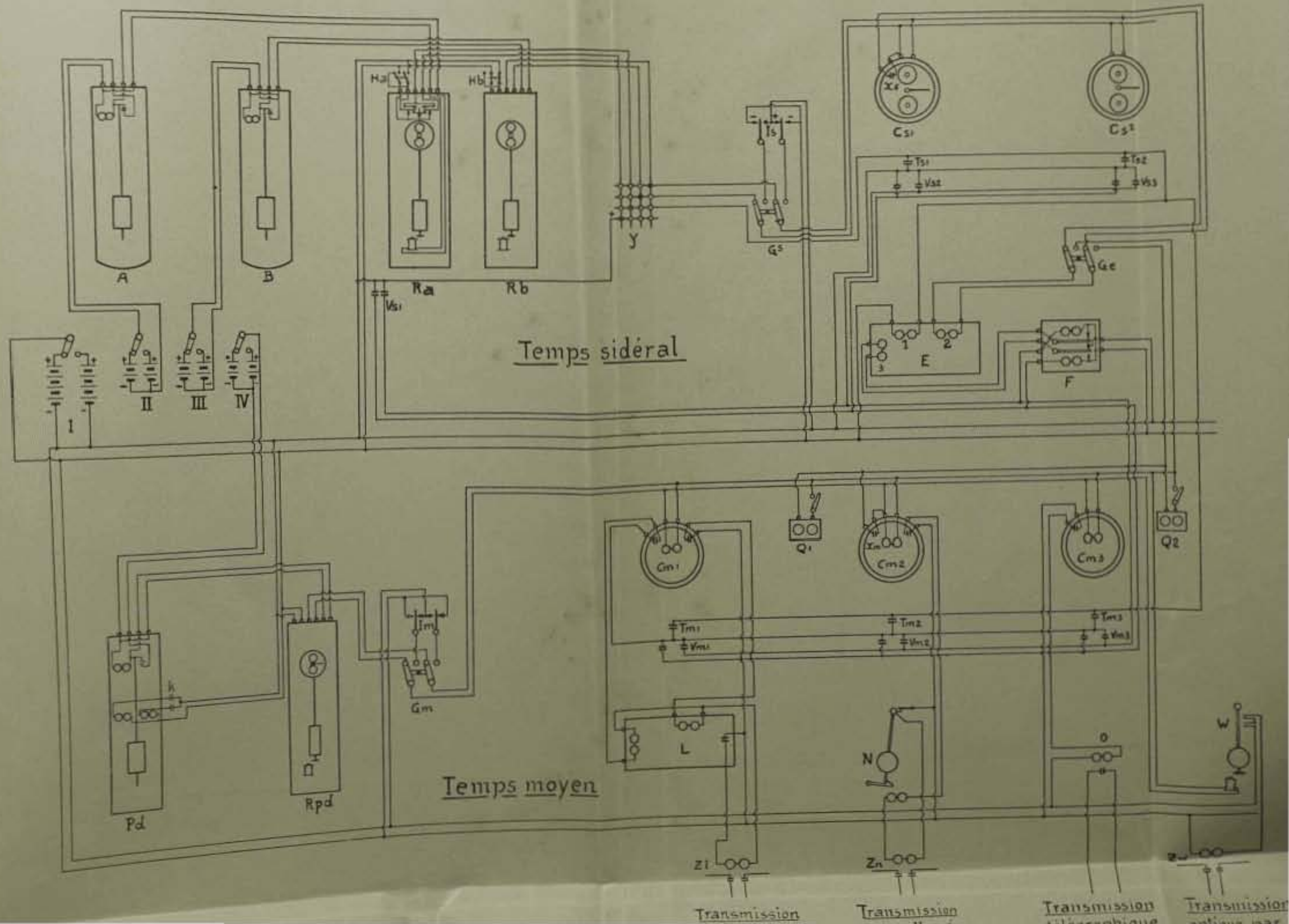
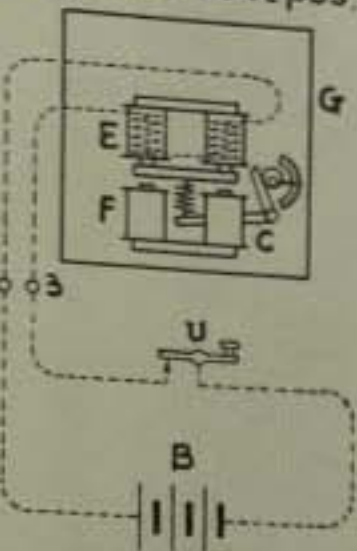


Schéma des communications électriques du Chronoscope de Hipp.

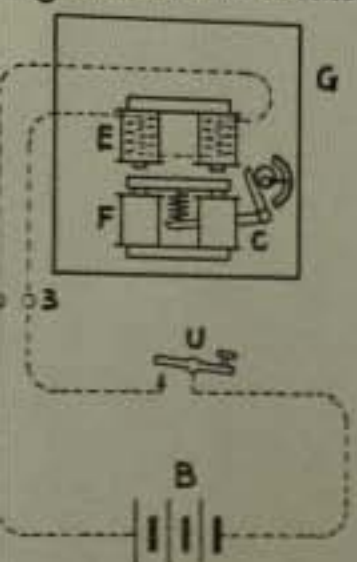
I
MESURE DE LA DURÉE D'UNE
INTERRUPTION DE COURANT.

Electro-aimant E en circuit.
Ressort du levier C armé.

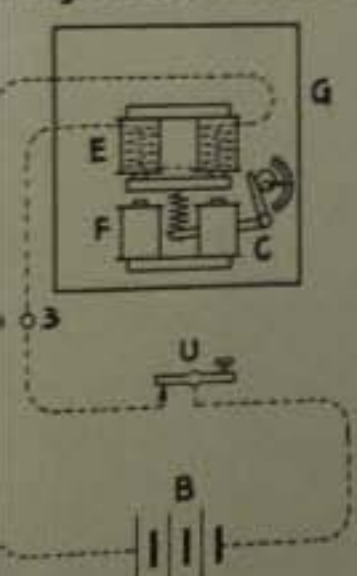
— Fig: 1 —
Aiguilles au repos.



— Fig: 2 —
Aiguilles en mouvement.



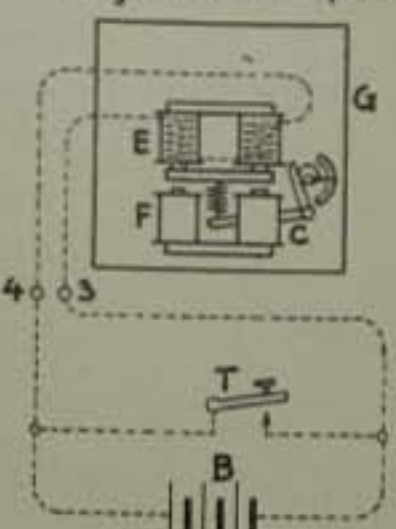
— Fig: 3 —
Aiguilles arrêtées.



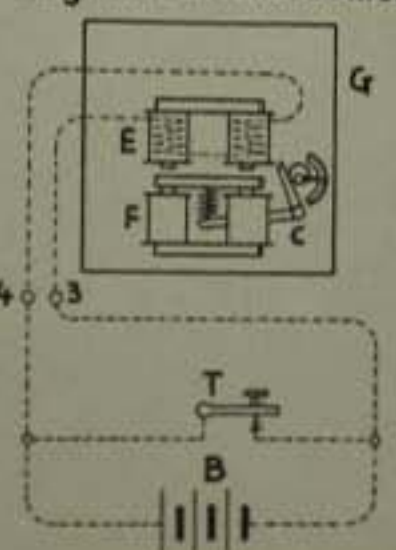
II
MESURE DE LA DURÉE D'UNE
EMISSION DE COURANT.

Electro-aimant E en circuit.
Ressort du levier C armé.

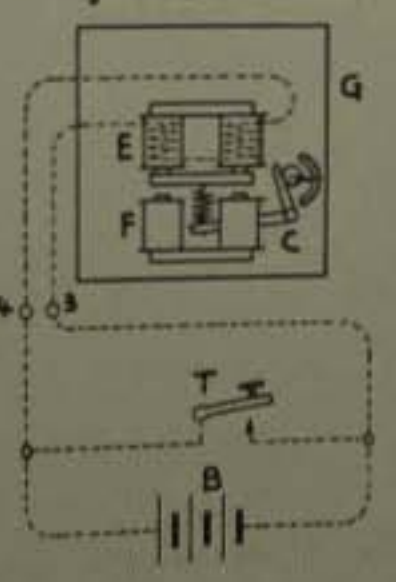
— Fig: 1 —
Aiguilles au repos.



— Fig: 2 —
Aiguilles en mouvement.



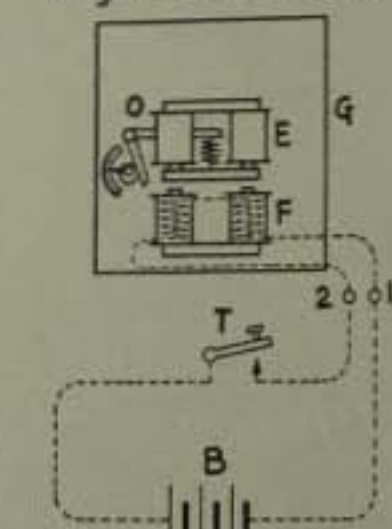
— Fig: 3 —
Aiguilles arrêtées.



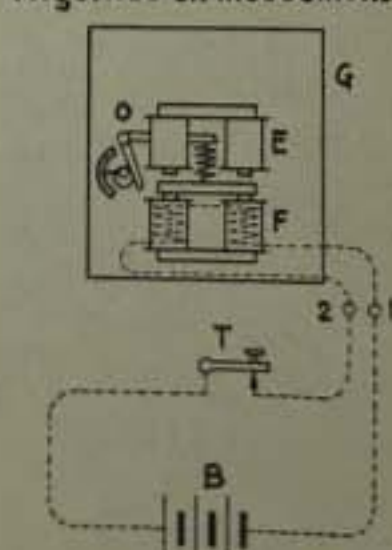
III
MESURE DE LA DURÉE D'UNE
EMISSION DE COURANT.

Electro-aimant F en circuit.
Ressort du levier O armé.

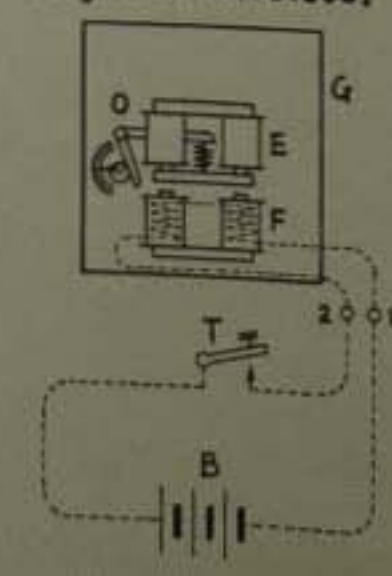
— Fig: 1 —
Aiguilles au repos.



— Fig: 2 —
Aiguilles en mouvement.



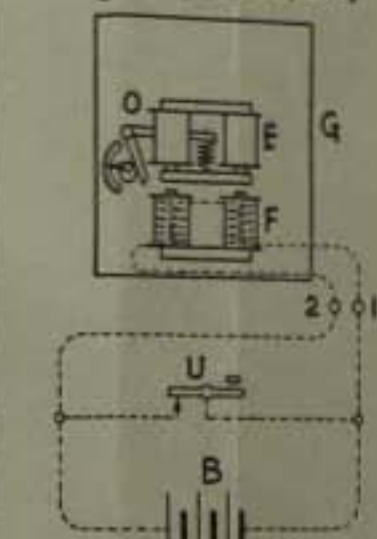
— Fig: 3 —
Aiguilles arrêtées.



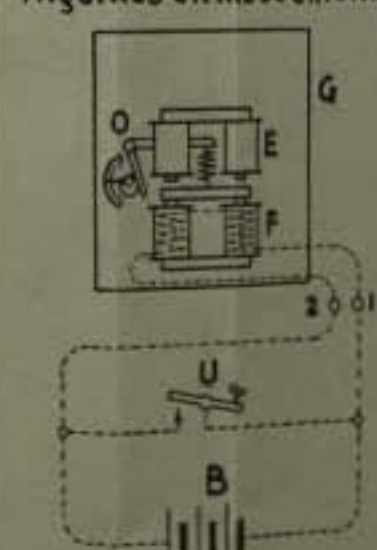
IV
MESURE DE LA DURÉE D'UNE
INTERRUPTION DE COURANT.

Electro-aimant F en circuit.
Ressort du levier O armé.

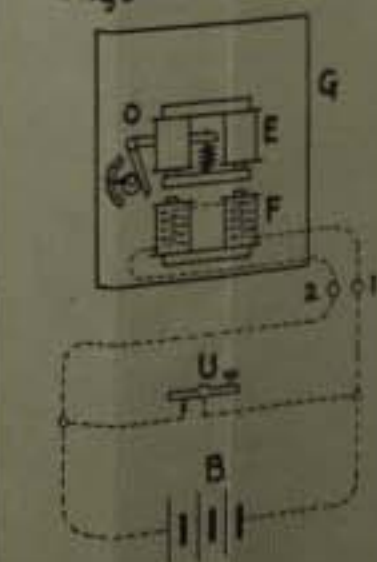
— Fig: 1 —
Aiguilles au repos.



— Fig: 2 —
Aiguilles en mouvement.



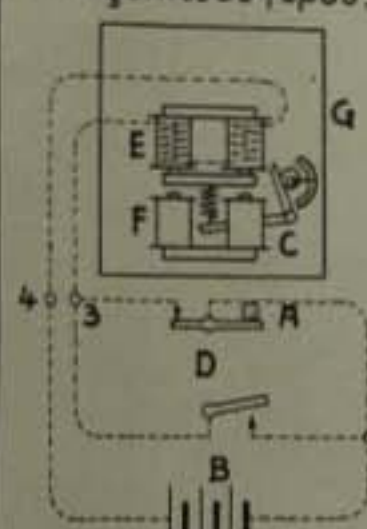
— Fig: 3 —
Aiguilles arrêtées.



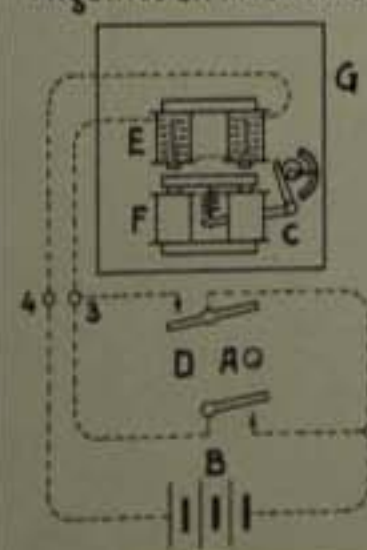
V
MESURE DE LA DURÉE DE CHUTE
D'UNE SPHERE A (par interruption).

Electro-aimant E en circuit.
Ressort du levier C armé.

— Fig: 1 —
Aiguilles au repos.



— Fig: 2 —
Aiguilles en mouvement.



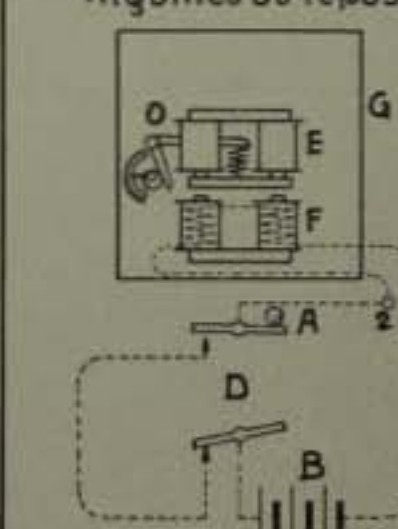
— Fig: 3 —
Aiguilles arrêtées.



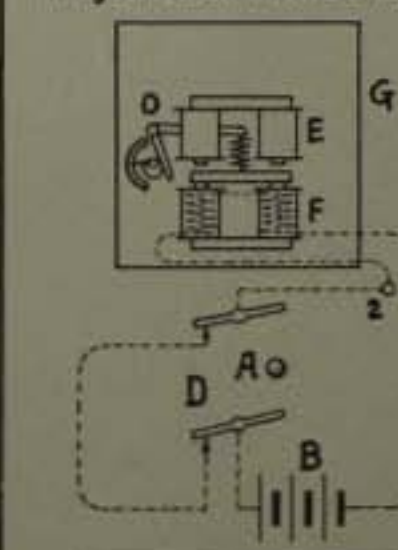
VI
MESURE DE LA DURÉE DE CHUTE
D'UNE SPHERE A (par fermeture).

Electro-aimant F en circuit.
Ressort du levier O armé.

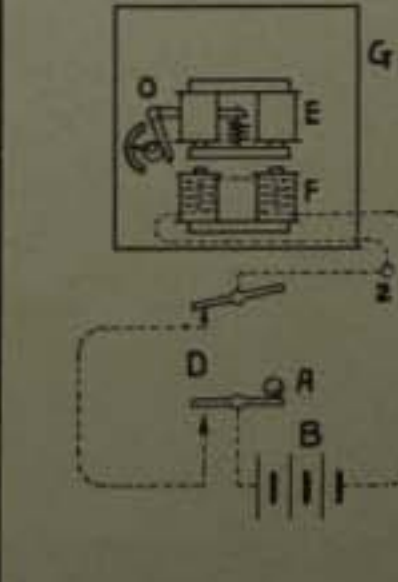
— Fig: 1 —
Aiguilles au repos.



— Fig: 2 —
Aiguilles en mouvement.



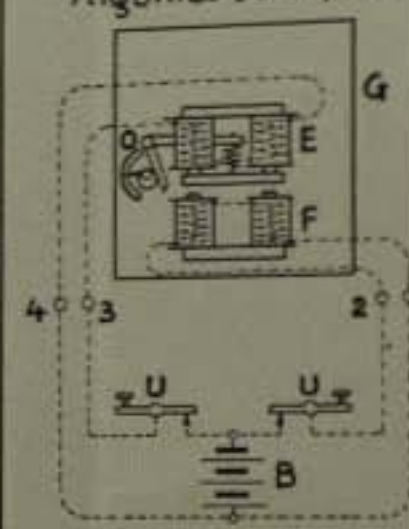
— Fig: 3 —
Aiguilles arrêtées.



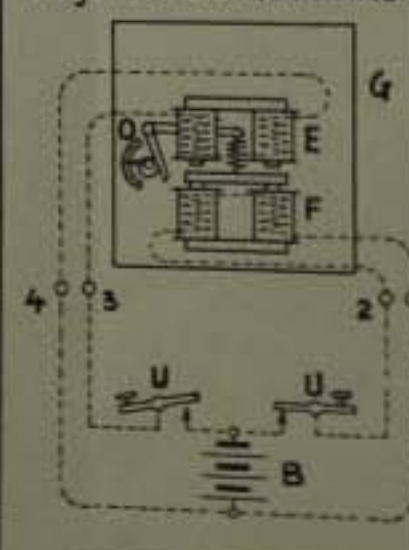
VII
MESURE DE LA DURÉE D'UNE
INTERRUPTION (à interrupteurs).

Electro-aimants E et F en circuit.
Ressort du levier O armé.

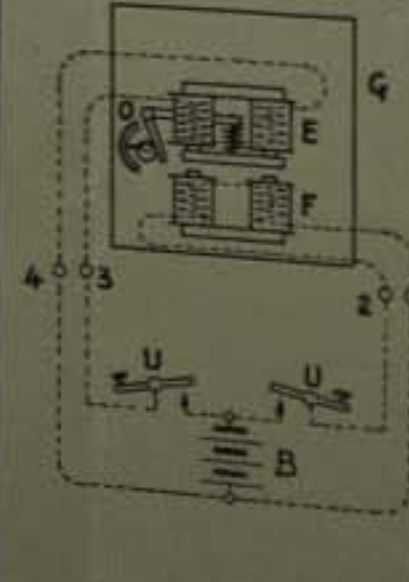
— Fig: 1 —
Aiguilles au repos.



— Fig: 2 —
Aiguilles en mouvement.



— Fig: 3 —
Aiguilles arrêtées.





BAG, Turin.



BAG, Turin.



BAG, Turin.



E. Böhlsberger, Neuchâtel.



BAG, Turin.



BAG, Turin.



E. Böhlsberger, Neuchâtel.



E. Böhlsberger, Neuchâtel.



Piet & Co. Lyons.

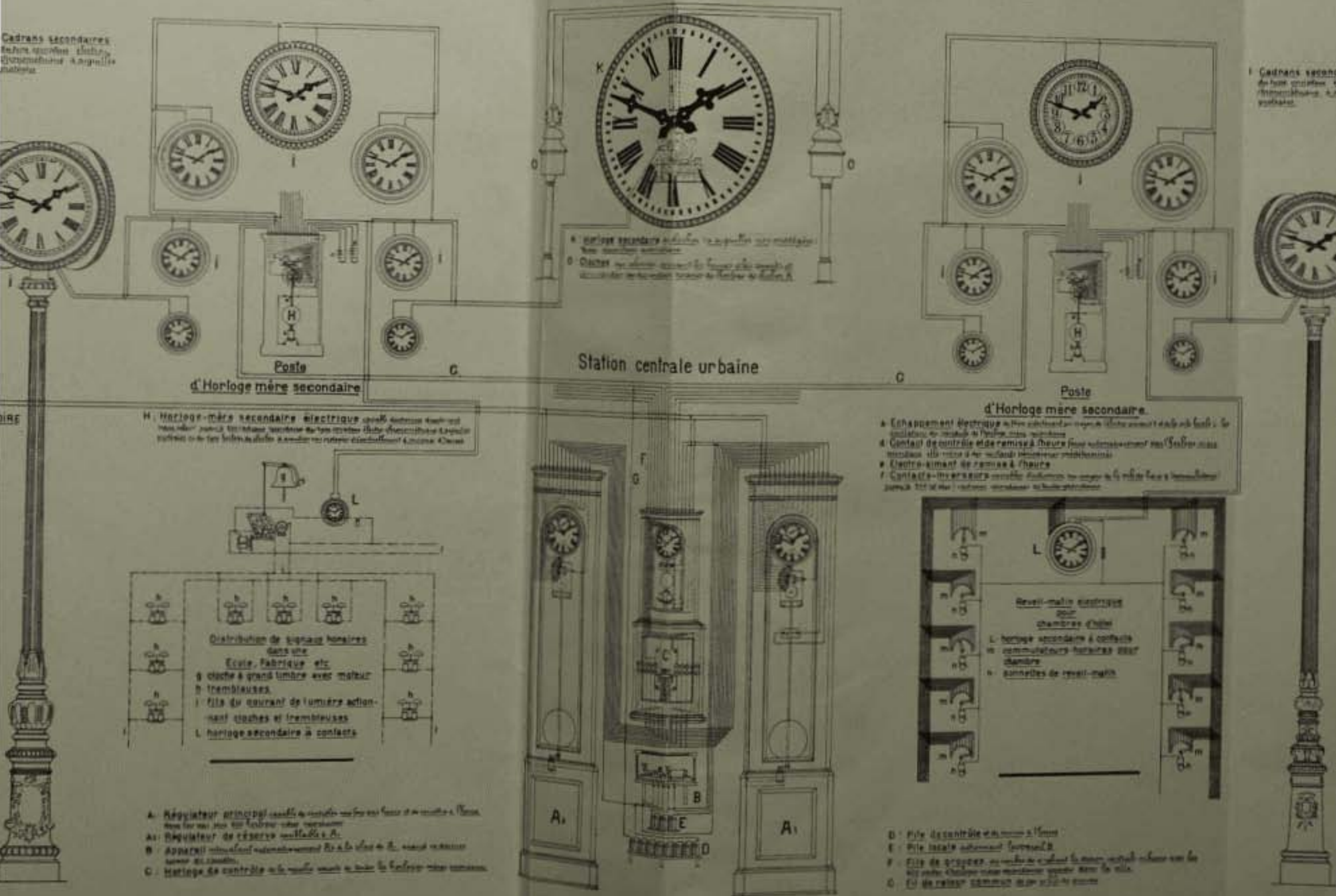


UNIFICATION ÉLECTRIQUE DE L'HEURE DANS UNE GRANDE VILLE

Système Favarger & Cie

Cadrons secondaires
de l'usine électrique
d'Électricité de la ville
de Paris

Cadrons secondaires
de l'usine électrique
d'Électricité de la ville
de Paris



Station centrale horaire système Favarger & Co.

Vue de devant.

Horloge-mère principale

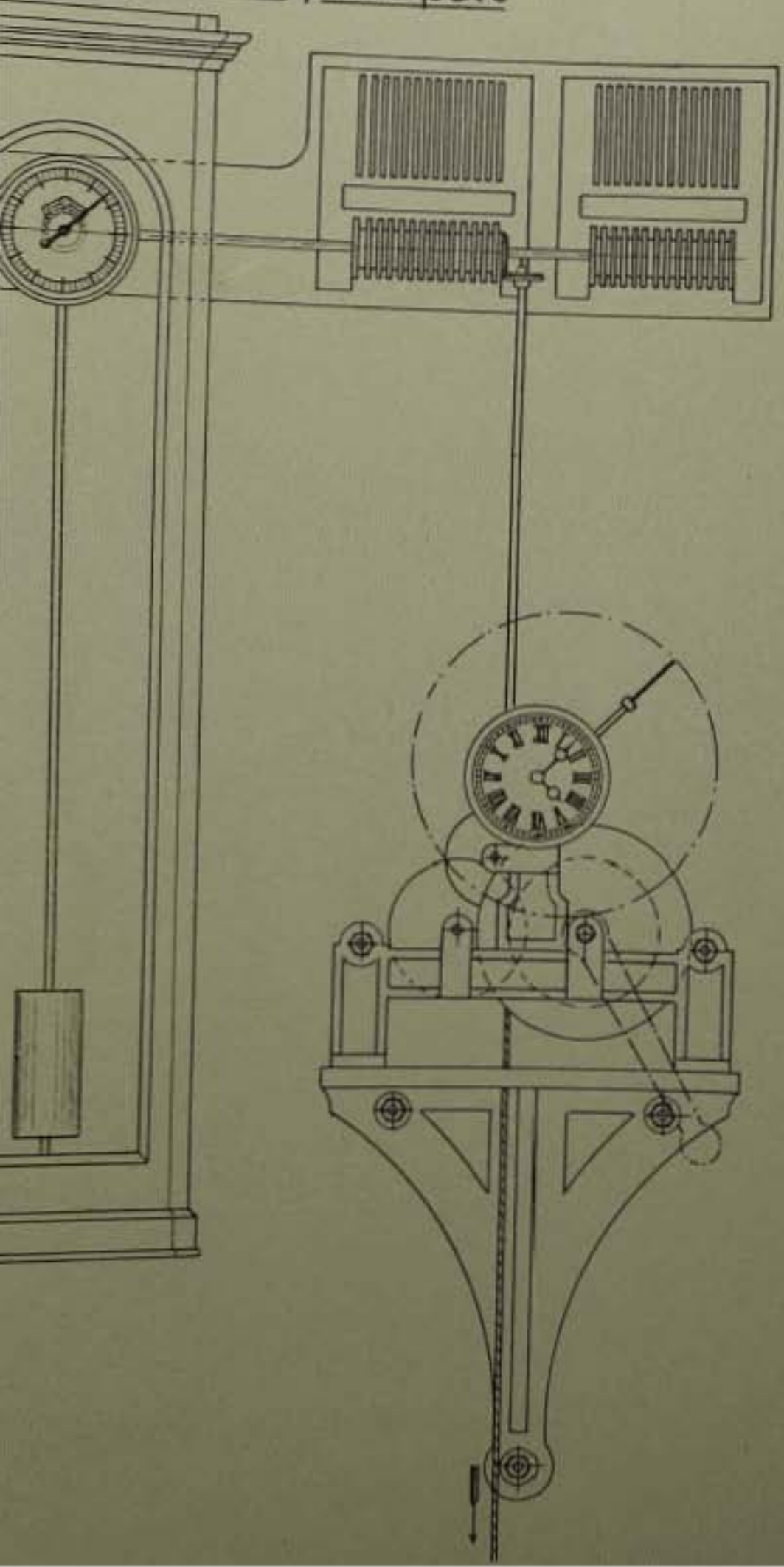
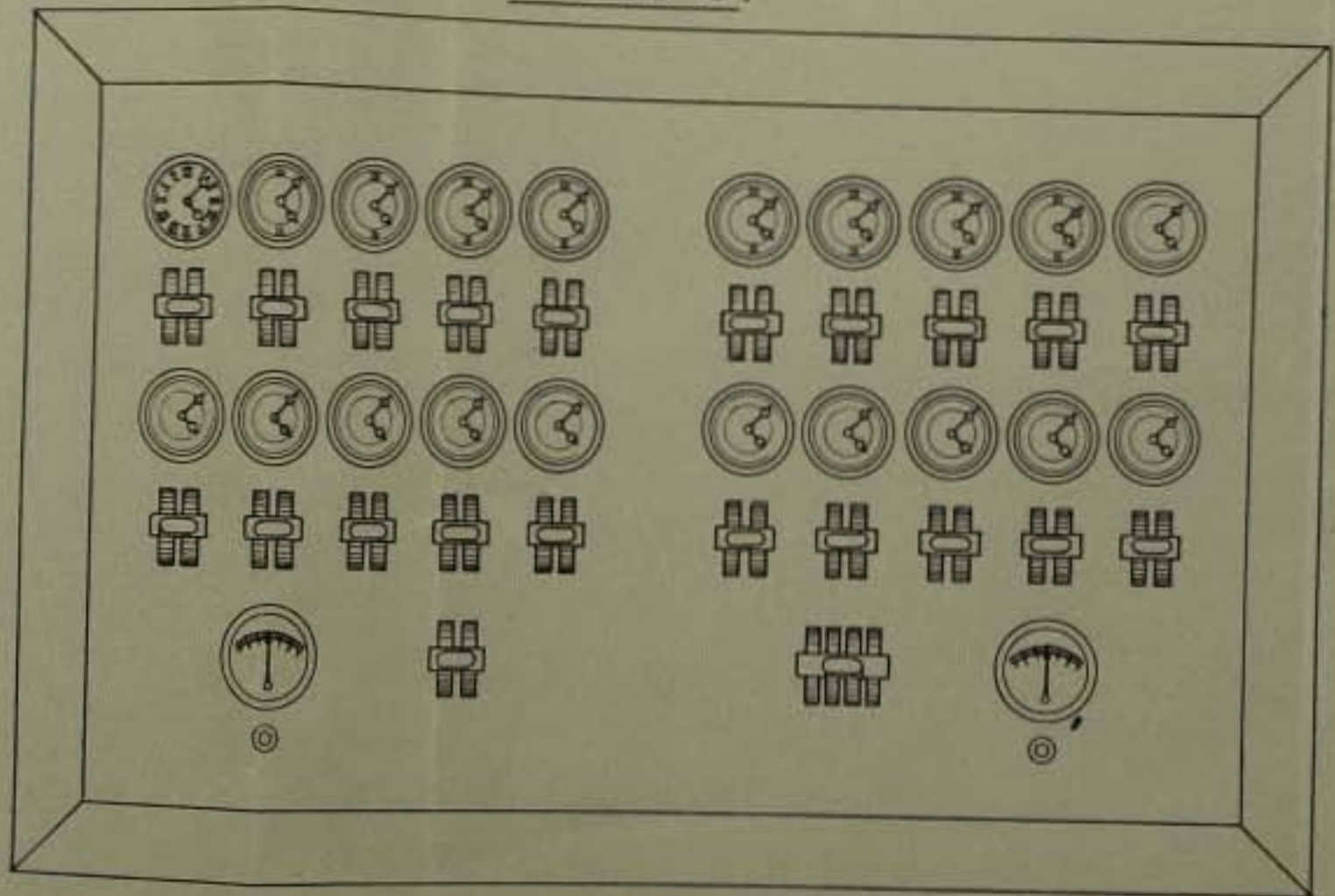
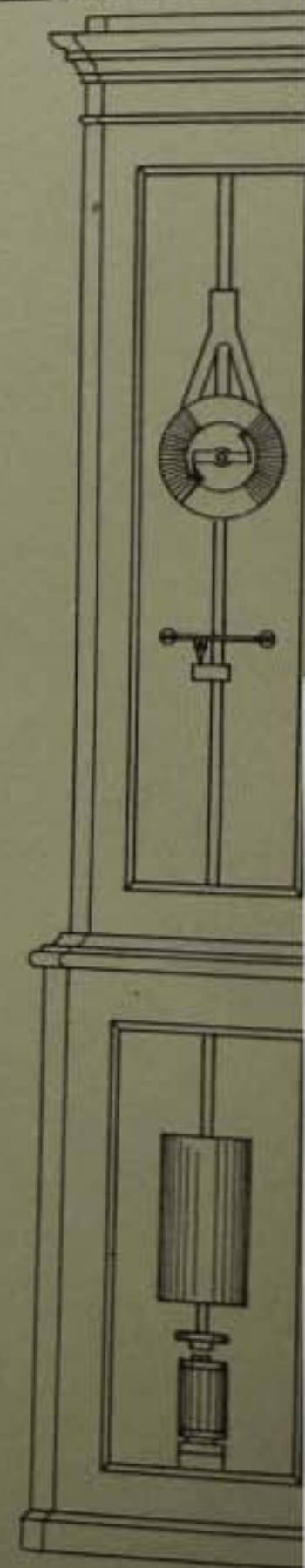


Tableau C.



Horloge-mère de ré



Station centrale horaire système Favarger & Co.

Schéma des communications.

