**SUR LA SYNCHRONISATION DES HORLOGES DE PRÉCISION
ET LA DISTRIBUTION DE L'HEURE;**

PAR M. A. CORNU.

Les études théoriques et expérimentales relatives à la synchronisation des systèmes oscillants (*Journal de Physique*, t. VI, p. 445 et 452) s'appliquent immédiatement aux horloges de précision et à la distribution de l'heure. Je décrirai brièvement la construction et les propriétés d'un dispositif très simple, applicable à toute espèce d'appareils oscillants et réalisant les conditions théoriques dans lesquelles le problème de la synchronisation a été résolu.

Dispositif général. — On fixe transversalement à la tige du balancier à synchroniser (*fig. 1*), au-dessous (ou au-dessus) de la

Fig. 1.

lentille et dans le plan d'oscillation, un barreau aimanté A_1A_2 courbé suivant une circonférence concentrique à la suspension C : deux bobines en bois ou en ébonite, couvertes de fils de cuivre isolé B_1B_2 , enveloppent respectivement les extrémités de ce bar-

J. de Phys., 2^e série, t. VII. (Juin 1888.)

18

reau; leurs axes coïncident avec la direction moyenne de déplacement du pôle correspondant. L'une de ces bobines B_1 reçoit le courant électrique synchronisant (*liaison synchronique*) et fonctionne *par attraction* sur le pôle d'aimant qu'elle enveloppe; l'autre B_2 , fermée sur une résistance convenable R_2 , produit, par l'action inductrice de l'autre pôle, l'amortissement nécessaire à la synchronisation (¹).

Si la longueur du barreau et celle des bobines sont suffisamment grandes relativement à l'amplitude du déplacement des pôles, les portions utilisées du champ magnétique des bobines ont une intensité sensiblement uniforme: on réalise ainsi d'une manière pratiquement rigoureuse les trois forces capables de produire la synchronisation (*loc. cit.*, p. 445), savoir:

1° Force principale (composante du poids) proportionnelle à l'écart;

2° Force perturbatrice (amortissement) proportionnelle à la vitesse;

3° Force additionnelle (*liaison synchronique*) d'intensité périodique, indépendante de la position du système.

Éléments de réglage. — Courant. — Le courant synchronisant lancé à chaque période Θ par l'horloge directrice (figurée ici par le contact-distributeur I dans le circuit de la pile P) peut être réglé de plusieurs manières:

1° Par le nombre et la grandeur des couples de la pile;

2° Par la durée de l'émission du courant;

3° Par la dérivation R_1 reliant les extrémités des fils de la bobine B_1 .

La pile n'a pas besoin d'être très énergique: l'action électromagnétique de la bobine, étant tangentielle et s'exerçant à l'extrémité d'un long bras de levier, est très puissante; aussi reconnaît-on, dès les premiers essais, qu'un courant extrêmement faible (quelques millièmes d'ampère) suffit pour mettre en mouvement

(¹) Ce dispositif, en apparence identique à celui de Jones et à d'autres plus récents, en diffère par l'utilisation d'une bobine comme *amortisseur*; condition essentielle, dont l'importance n'avait pas encore été signalée.

un balancier de plusieurs kilogrammes partant du repos. C'est un des avantages les plus précieux de ce dispositif : il le doit à deux particularités qu'il importe de mettre en lumière.

L'action électromagnétique d'une bobine donnée est proportionnelle au produit de l'intensité du courant par la masse magnétique du pôle d'aimant sur lequel elle agit. On dispose donc, par le choix du barreau aimanté, d'un facteur qui permet de multiplier la force électromagnétique par un nombre considérable. Mais on dispose encore ici d'un autre facteur, la durée de l'émission du courant : en effet, le courant n'a pas besoin d'être instantané (*voir* les remarques *loc. cit.*, p. 457 et 462); or, dans le cas où l'amortissement est notable, cette durée peut s'étendre utilement jusqu'à une demi-période. Grâce à ces deux multiplicateurs, on pourrait diminuer en quelque sorte indéfiniment l'intensité du courant, si l'on n'était pas limité par certains phénomènes secondaires et par la nécessité de laisser à cette intensité une valeur suffisante pour le fonctionnement des électro-aimants (enregistreurs, relais, parleurs, téléphones, etc.) qu'il est utile de maintenir dans le circuit.

L'emploi des courants faibles est avantageux à bien des points de vue : l'un des principaux est d'éviter les étincelles d'extra-courants de rupture, qui altèrent à la longue les surfaces de contact (en platine pur) du distributeur; l'addition d'un condensateur Fizeau ou d'une résistance électrolytique polarisable ⁽¹⁾ en dérivation aux bornes du distributeur achève d'assurer la conservation parfaite des contacts.

La dérivation R_1 est aussi un palliatif des extra-courants de la bobine B_1 ; elle fournit, en outre, un réglage facile de l'action électromagnétique indépendant de celui de la pile et du distributeur, avantage très grand lorsque l'horloge distributrice se trouve à une grande distance de l'appareil synchronisé. Il ne faut pas oublier que cette dérivation ferme d'une manière permanente le circuit de la bobine B_1 et la fait agir comme amortisseur concurremment avec la bobine B_2 .

(1) Le *coupe-courant* de M. d'Arsonval, formé de deux fils de fer plongeant dans quelques centimètres cubes d'une solution aqueuse de potasse, est un excellent dispositif : on en règle le nombre d'après l'étincelle de rupture; avec les courants dont il est ici question, un seul suffit en général.

Réglage de l'amortissement. — La valeur de l'amortissement est corrélative de celle du courant employé : en effet, plus l'amortissement est faible, moins la force motrice synchronisante a besoin d'être énergique. Il semble donc qu'on ait intérêt à employer un amortissement et un courant aussi faibles que possible pour économiser les piles et ménager les contacts du distributeur. Mais, d'un autre côté, plus l'amortissement est grand, plus la durée du régime variable est courte (*loc. cit.*, p. 446), par conséquent, plus la synchronisation est rapide, parfaite et indépendante des variations inévitables du courant synchronisant : c'est donc l'amplitude de ces variations anormales qui déterminera la grandeur de l'amortissement à employer; de sorte que, en dernière analyse, le réglage cherché dépendra presque exclusivement des conditions pour ainsi dire *télégraphiques* du circuit.

Le critérium d'un synchronisme parfait est, en effet, la constance de l'amplitude du balancier synchronisé : cela résulte des expressions (13) et (14) (*loc. cit.*, p. 459) qui donnent l'amplitude $\mathfrak{A}$ et la phase γ limites :

$$(13) \quad \mathfrak{A} = \frac{uT}{2\pi(\Theta - T)} \sin \gamma,$$

$$(14) \quad \tan \gamma = \frac{2\pi}{\alpha\Theta} \frac{\Theta - T}{T} = \frac{2\pi}{\alpha\mathfrak{C}}.$$

On reconnaît aisément, en se reportant à la démonstration et à la *fig.* 2, que les erreurs de synchronisme ne sont à redouter que pendant les régimes variables accidentels survenus à la suite d'un changement dans la grandeur moyenne de l'action synchronisante u . C'est pour cela qu'on a intérêt à réduire autant que possible la durée de ces régimes variables par la grandeur de l'amortissement.

Il est important de remarquer que, dès qu'un nouveau régime permanent est atteint (amplitude redevenue constante), toute trace de la perturbation disparaît, si la perturbation n'a porté que sur la force synchronisante u , quand bien même la nouvelle amplitude serait différente de l'amplitude primitive; c'est qu'en effet la différence de phase γ entre l'horloge directrice et le balancier synchronisé est indépendante de la valeur de cette force.

On voit dans la même formule (14) un autre motif pour donner à l'amortissement α une valeur notable : c'est qu'on atténue pro-

portionnellement l'erreur provenant d'une variation de la différence des périodes $\Theta - T$, puisque α est en dénominateur.

Il en résulte encore qu'on peut synchroniser deux balanciers pour lesquels cette différence $\Theta - T$ est relativement considérable, à la condition d'augmenter l'amortissement; on obtient aisément le synchronisme entre deux horloges dont la différence

Fig. 2.

de marche diurne est de ± 4 minutes, c'est-à-dire entre une horloge *sidérale* et une horloge *moyenne* ⁽¹⁾.

Remarque. — L'amortissement, absolument nécessaire pour arriver au synchronisme, peut être obtenu de bien des manières; on pourrait, par exemple, employer un simple tube de cuivre, ou, rejetant toute induction électromagnétique, utiliser le frottement d'un fluide visqueux, ou simplement de l'air ⁽²⁾. Mais l'emploi de bobines à fil isolé permet d'établir ou de supprimer à volonté l'amortissement additionnel sans rien changer aux conditions purement mécaniques de l'appareil; ainsi, il suffit d'ouvrir les circuits des deux bobines pour retrouver le mouvement du balancier libre,

(¹) J'ai même atteint $6^m 30^s$: le système Foucault-Vérité, employé à l'Observatoire et à la Ville de Paris, dans lequel l'amortissement est à dessein rendu presque nul, ne tolère que quelques *secondes d'avance* diurne.

(²) C'est même à l'existence presque inévitable de résistances proportionnelles à la vitesse, produisant un faible amortissement, que divers systèmes de synchronisation, incorrects en théorie, parviennent à fonctionner : on s'explique alors pourquoi leur réglage est toujours délicat et leur stabilité précaire.

affranchi de toutes les actions ou réactions électromagnétiques destinées à le synchroniser. Cette condition est éminemment favorable à l'étude expérimentale du réglage.

Balanciers entretenus mécaniquement. — Les résultats précédents, rigoureux dans le cas d'un *balancier libre*, c'est-à-dire indépendant de tout mécanisme, s'étendent sans peine au cas où le balancier est soumis périodiquement, comme dans les horloges, à une action automatique qui restitue la force vive absorbée par les résistances passives.

L'analyse mécanique de l'influence de l'échappement et des rouages montre que tout revient, au point de vue analytique, à supposer le coefficient α non plus constant, mais fonction de l'amplitude, c'est-à-dire à remplacer, dans la formule (14), α par

$$\beta = f(\psi).$$

Cette condition complique théoriquement toutes les propriétés si simples énoncées précédemment; mais, dans la pratique, la fonction f diffère très peu d'une constante et sa variation n'exerce qu'une influence minime. Dans le cas des horloges à poids (¹), par exemple, on démontre aisément que la valeur de β est donnée par

$$\beta = \alpha_0 + \alpha_1 - \frac{h}{\psi^2}, \quad \text{où} \quad h = \frac{p z T}{4 \pi^2 \mu},$$

α_0 représentant le coefficient d'amortissement du pendule libre, α_1 celui que produit l'amortisseur, et h un paramètre proportionnel au travail dû à la chute z du poids moteur p à chaque période T du balancier, et en raison inverse du moment d'inertie μ .

(¹) L'étude expérimentale de l'amplitude des balanciers d'horloge, lorsqu'on fait varier le poids moteur, m'a conduit à la loi suivante :

L'amplitude limite du balancier d'une horloge est proportionnelle à la racine carrée du poids moteur.

On retrouve cette loi empirique par la théorie, en admettant :

1° Que la pression de la roue d'échappement sur le balancier s'effectue au moment du passage à la verticale; c'est la condition que les horlogers cherchent à remplir;

2° Que la force vive restituée au balancier pendant l'échappement est égale au travail de la chute du poids moteur.

Comme, dans les horloges de précision, le travail du poids moteur dépensé à chaque oscillation est très faible, le coefficient h est très petit : de sorte que l'amortissement additionnel α_1 nécessaire pour rendre la différence de phase γ sensiblement indépendante de l'amplitude limite, c'est-à-dire pour légitimer l'identification du balancier d'horloge à un balancier libre, n'est pas considérable. Il y a même un cas important où l'identification est rigoureuse, c'est celui où l'amplitude limite est égale à celle que prend le balancier quand on supprime la synchronisation (ouverture des circuits des deux bobines). Au voisinage de cette amplitude, qu'on cherchera généralement à conserver, l'influence du terme perturbateur sera donc négligeable.

Remarque. — Les détails un peu minutieux avec lesquels les éléments de réglage viennent d'être décrits pourraient faire supposer que le réglage des appareils synchronisés est délicat à obtenir et difficile à conserver : il n'en est rien. L'expérience, au contraire, réussit immédiatement et l'on constate, non sans surprise, que le balancier à synchroniser, partant du repos, se met en marche de lui-même dès qu'il reçoit l'action périodique du moindre courant ; d'autre part, avec des courants relativement intenses, on reconnaît que le balancier *ne s'emporte pas* outre mesure : c'est qu'en effet l'amortisseur, dont l'action est presque insensible aux petites amplitudes, agit aux grandes amplitudes comme un frein puissant. Cette précieuse propriété de l'amortisseur laisse une grande latitude pour le réglage du courant. La discussion précédente a donc eu surtout pour but de mettre en lumière toutes les ressources que comporte le dispositif et de montrer comment, dans chaque cas, on peut obtenir le maximum d'effet utile, soit qu'on recherche l'extrême précision, soit qu'on vise surtout à l'économie d'entretien.

Avantages essentiels du système de synchronisation avec amortisseurs électromagnétiques. — En voici l'énumération succincte :

1° Synchronisation sensiblement indépendante du signe et de la grandeur de la marche diurne relative ou tout au moins de sa

variation, lorsque le coefficient d'amortissement α est suffisamment grand [analytiquement, αT grand relativement à $2\pi \frac{\theta - T}{\theta}$, voir formules (13), *loc. cit.*, p. 459]. Cela permet d'utiliser des appareils de médiocre précision.

2° Faiblesse des courants nécessaires au fonctionnement ;

3° Possibilité de vérifier à chaque instant la stabilité de la synchronisation par l'observation de l'amplitude et de la phase du balancier (ces deux éléments ne peuvent rien indiquer sous ce rapport dans le système sans amortissement, parce qu'on a cherché, dans ce système, à les rendre invariables par construction) ;

4° Variété des moyens utilisables pour établir ou modifier le réglage, même pendant la marche de l'appareil ;

5° Mise en marche à peu près automatique, lorsque la synchronisation commence ;

6° Arrêt automatique, lorsque la synchronisation cesse.

Applications. — L'application pratique de ce système de synchronisation a été déjà réalisée dans des circonstances très diverses : la régularité du fonctionnement a toujours été complète. Je l'emploie à l'École Polytechnique, depuis plusieurs années, à synchroniser divers appareils, en particulier deux horloges à secondes ; à l'Observatoire, sur la demande de notre Confrère M. l'amiral Mouchez, j'ai adapté ce système à la synchronisation des deux horloges du pavillon des Longitudes ; dans les ateliers de M. Borrel trois balanciers pesant respectivement 250^{gr}, 1^{kg} et 40^{kg} ont été synchronisés par le même courant depuis deux ans sans interruption. Enfin, au Service géographique de l'Armée, notre Confrère M. le général Perrier a fait expérimenter ce système par M. le capitaine Defforges sur deux horloges distantes de 40^{km} ; malgré l'imperfection de la ligne qui permettait à peine la correspondance télégraphique, la synchronisation a été aussi satisfaisante que possible.

Le problème de la distribution de l'heure à une précision voisine du centième de seconde me paraît donc complètement résolu. Il n'est peut-être pas indifférent de faire remarquer que le dispositif est simple, d'un réglage facile et n'exige que de faibles courants.

Dans un prochain travail, je résumerai la marche à suivre au point de vue pratique pour régler l'intensité du courant synchronisant et la grandeur du coefficient d'amortissement à donner au balancier.