

SEPT 1956

Applications des

PROPRIÉTÉS ÉLECTRONIQUES

DES SOLIDES A LA CHRONOMÉTRIE

(suite et fin)

RÉSUMÉ

La première partie de cette étude publiée dans le N° 27 de la « Montre Française » a été consacrée à l'examen des propriétés de substances cristallines récemment élaborées qui ont permis de constituer des résistances électriques automatiquement variables et des amplificateurs électroniques miniatures appelés « transistors ». Ces derniers dispositifs fonctionnent avec un rendement élevé au moyen de tensions très faibles et peuvent faciliter la distribution

d'impulsions de courant dans les électro-aimants alimentés par piles ou par accumulateurs.

Après un rappel des propriétés des dispositifs moteurs employés en horlogerie électrique l'auteur étudie, dans le présent article, la protection des interrupteurs à micropression au moyen de résistance non linéaires et de transistors. Les nouvelles triodes à cristal, associées à des détecteurs ne nécessitant pas de contacts intermittents, permettent aussi de réaliser des remontoirs à moteurs électroniques et des vibrateurs isochrones capables d'asservir des récepteurs relativement puissants.

IV. — PRINCIPES DES PREMIÈRES HORLOGES ÉLECTRIQUES.

Pour pouvoir apprécier l'importance et la portée des découvertes récentes concernant les semi-conducteurs et les triodes à cristal, il est utile de connaître les difficultés qui ont empêché le développement rapide de la chronométrie

électrique.

On sait que, peu après les découvertes par Ampère et Arago des propriétés du solénoïde et de l'aimantation du fer au moyen du courant électrique, d'innombrables inventeurs ont essayé d'actionner les instruments horaires par les forces électromagnétiques. Dans certains systèmes anciens, l'organe réglant usuel (pendule ou

balancier spiral) est conservé; dans d'autres, l'oscillateur isochrone joue aussi le rôle d'un moteur à mouvement alternatif et actionne les aiguilles par l'intermédiaire d'un compteur d'impulsions mécaniques et électriques.

Les croquis très schématiques fig. 7, 8, 9 représentent trois modes de réalisation typiques de pendules et de montres utilisant la transformation de l'énergie électrique en travail mécanique.

On remarquera que les remontoirs de L. Bréguet (fig. 7) et de A. Hennequin (fig. 8) permettent d'exercer sur la roue d'échappement R_e un couple moteur sensiblement constant. Le dispositif proposé par Ch. Leroy et J.E. Vernhet (fig. 9) conduit à la construction d'une montre qui ne comporte pas de ressort-moteur et fonctionne avec des forces minimes. Le mécanisme de ce système est un compteur d'oscillations dont la construction peut être extraordinairement simplifiée.

Ces trois ingénieux dispositifs n'ont pas donné tous les résultats espérés et ils ont été abandonnés peu après leur création. Cependant ces échecs ne résultent pas de défauts irrémédiables et nous verrons que les progrès des semi-conducteurs permettent désormais de profiter de l'œuvre des pionniers qui ont eu la tâche ingrate de défricher le champ des recherches.

Avant d'aborder l'étude des réalisations modernes, nous analyserons rapidement le fonctionnement des organes moteurs employés dans les premières horloges électriques.

1^o *Electro-aimant à fer doux.*

Considérons le moteur à mouvement alternatif représenté schématiquement sur la fig. 10. Par un dispositif approprié, le courant i est interrompu dès que l'armature tournante A_f arrive dans l'orientation représentée sur la vue (b).

Pendant chaque fermeture du circuit le courant i s'établit progressivement et la pile fournit une énergie W_e dont une fraction, généralement faible, produit le travail utile W_m , c'est-à-dire la rotation en sens f de l'armature. Une autre partie de l'énergie W_e est dissipée en chaleur (effet Joule).

Après l'attraction de A_f , le courant prend

une valeur I et l'électro-aimant engendre un flux d'induction magnétique. De ce fait, il a acquis une énergie potentielle W_p appelée énergie électrocinétique. Cette énergie localisée dans le champ d'induction magnétique, a pour expression: $W_p = 1/2 L I^2$.

(L est l'inducteur propre du circuit, l'armature A_f se trouvant dans la position b).

C'est surtout l'énergie W_p qui cause les perturbations les plus à redouter. En effet, la diminution rapide du flux embrassé par l'enroulement B développe le long des spires une force électromotrice d'autoinduction très élevée et le pouvoir isolant de la mince couche d'air entre les contacts K_1 et K_2 est souvent insuffisant pour résister à la surtension; dans ce cas, la coupure du circuit est traversée par un arc qui livre passage au courant i et le prolonge pendant un instant. Des particules du métal chauffé se trouvent placées dans les conditions d'une émission thermo-électronique; elles sont détachées et les grains de matière subissent des actions chimiques. La pratique montre que des contacts métalliques initialement propres se noircissent rapidement et perdent leur conductibilité.

Le pouvoir destructif de chaque étincelle dépend de l'énergie potentielle W_p emmagasinée dans l'inductance L .

2^o *Dispositifs étouffeurs d'étincelles.*

L'énergie potentielle électrocinétique W_p est comparable à l'énergie mécanique $1/2 M V^2$ que l'on considère en dynamique lorsqu'on étudie le choc provenant de l'arrêt brusque d'une masse M lancée à la vitesse V sur un butoir K . En construction mécanique, on atténue les effets de l'énergie cinétique au moyen de freins et d'amortisseurs à élasticité qui réduisent les pressions exercées sur les butes limitant les courses des pièces mobiles.

Cette analogie a suggéré l'étude de nombreux dispositifs capables de protéger les interrupteurs électriques. Les principaux systèmes de ce genre sont dus à Fizeau, Foucault, Hipp. Dejardin (2). Les vues de la fig. 11 représentent les « étouffeurs d'étincelles » les plus employés.

(2) Cf: Dispositifs de protection des interrupteurs légers utilisés en horlogerie électrique (Annales Françaises de Chronométrie, N° 2, 1955).

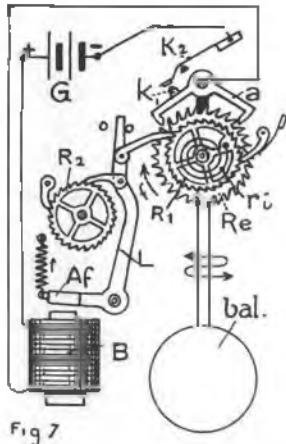


Fig. 7. — Remontoir L. Bréguet, 1856

L'électroaimant B entretient la tension constante du petit ressort-moteur r_1 et fait tourner la roue R^2 , dont l'axe commande le rouage des aiguilles et peut remonter un ressort de sonnerie.

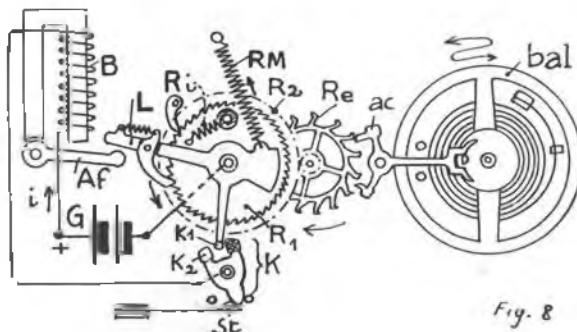


Fig. 8. — Remontoir A. Hennequin (brevet N° 200.691, 1889)

R M: ressort moteur fréquemment tendu par l'électromoteur B.

K: interrupteur périodique du type à fourche mi-conductrice, mi-isolante.

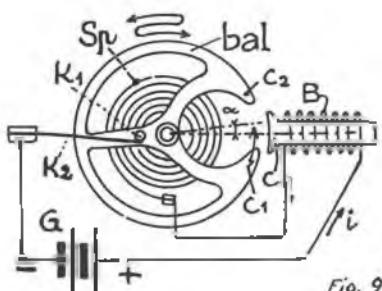


Fig. 9. — Balancier autoentretenu Ch. Leroy et J.-E. Vernhet (brevet N° 471.684, 1914).

Les becs polaires C^1 et C^2 sont attirés par C après chaque passage du balancier par la position d'équilibre. Un petit compteur d'oscillations (non représenté) actionne les aiguilles.

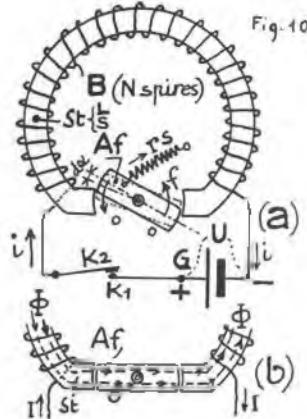


Fig. 10. — Electromoteur à armature tournante Af
Le contact K1 - K2 est interrompu lorsque l'armature Af se trouve dans la position b.

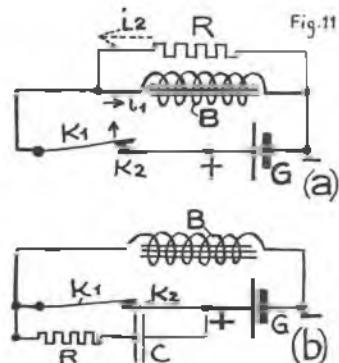


Fig. 11. — Etoffeurs d'étincelles: (a) système Dejardin, 1864; (b) système Fizeau, 1853

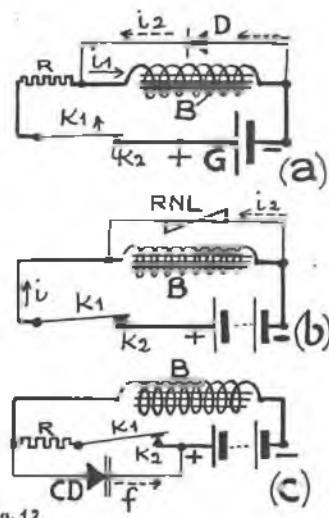


Fig. 12. — Etoffeurs d'étincelles utilisant les nouveaux semi-conducteurs électroniques

D: redresseur ou diode; RNL: résistance non linéaire; CD: redresseur présentant une grande capacité électrostatique dans le sens inverse à f.

V. — PERFECTIONNEMENTS APPORTÉS AUX ELECTROMOTEURS.

De nombreux brevets d'invention, déposés depuis une vingtaine d'années, concernent des modifications apportées aux dispositifs schématisés par les fig. 7 à 11. Diverses particularités d'exécution ont permis notamment d'améliorer le circuit magnétique des moteurs oscillants représentés sur la fig. 9. D'autres progrès résultent de l'utilisation d'alliage ferromagnétiques caractérisés à la fois par une haute perméabilité magnétique et par une boucle d'hystérésis très étroite.

L'augmentation de la perméabilité du circuit ferromagnétique permet de diminuer le diamètre des enroulements, ce qui réduit le périmètre moyen des spires et la perte d'énergie par effet Joule. La consommation de courant est abaissée mais, comme l'inductance L conserve une valeur élevée, il est indispensable de recourir à des protections très efficaces pour amortir ou détourner en dehors du contact périodique l'énergie electrocinétique $1/2 Li^2$.

Pour supprimer les micro-étincelles, on s'est servi avec succès de résistances de décharge constituées par des agrégats de poudres faiblement conductrices.

Des shunts résistants et parfois capacitatifs sont utilisés selon divers schémas identiques ou analogues à ceux de Fizeau et de Déjardin (fig. 11).

Ces perfectionnements ont déjà permis d'établir sur le principe schématisé en fig. 9 des montres d'automobiles très appréciées. Ces instruments fonctionnant au moyen des puissantes batteries installées sur les voitures, on peut se contenter d'électro-aimants simplifiés pouvant être établis très économiquement.

Actuellement de nouvelles études particulièrement importantes sont entreprises par plusieurs manufactures d'horlogerie en vue de la construction de montres-bracelets fonctionnant au moyen de micro-piles. Les difficultés de réalisation de ces minuscules mouvements horaires ont été surmontées et des prototypes satisfaisants ont été présentés en France dès 1952.

Les progrès obtenus ouvrent à la chronométrie électrique de vastes perspectives de dévelop-

pement et nous croyons que l'évolution technique qui se prépare pourra être favorisée aussi par les diverses possibilités de perfectionnement offertes par les semi-conducteurs électroniques étudiés dans la première partie de notre exposé. À titre d'exemple, nous allons décrire quelques dispositifs qui permettent de supprimer les défauts reprochés aux premières horloges représentées sur les fig. 7 à 10.

VI. — AMÉLIORATION DES ETOUFFEURS D'ÉTINCELLES.

Le dispositif Déjardin (fig. 11 a) présente l'inconvénient de dissiper beaucoup d'énergie car la résistance R est traversée par un courant pendant toute la durée de fermeture $K_1 - K_2$.

Les pertes sont réduites lorsque la résistance R est remplacée par un redresseur D ou par une varistance RNL (schémas a et c de la fig. 12).

Le schéma fig. 12 c représente un autre dispositif de protection qui consiste à shunter le contact $K_1 - K_2$ par une valve électrique D se comportant comme une « capacité dirigée ».

Nous avons vu plus haut, en nous référant à la fig. 10, que les interrupteurs non protégés sont détériorés par l'énergie electrocinétique ($W_p = 1/2 Li^2$) qui se convertit en énergie électrique et se dissipe dans l'entre-contact $K_1 - K_2$. Pour éviter l'effet destructeur de W_p , il faudrait pouvoir abaisser considérablement l'inductance L et le courant i dans la portion de circuit contenant l'interrupteur.

Ce résultat peut être obtenu au moyen d'un transistor à jonction TR formant un relais électronique interposé entre le contact $K_1 - K_2$ et l'enroulement fortement inductif BM (4).

La (fig. 13 a) montre très schématiquement un dispositif qui ne nécessite pas de source d'énergie auxiliaire.

Le contact intermittent est intercalé dans un circuit de commande comprenant la pile G et une forte résistance non inductive Rni . La sensibilité du transistor permet de réduire considérablement le courant id coupé par $K_1 - K_2$. L'énergie qui tend à détériorer l'interrupteur est

(4) Brevet N° 1.092.411; demande d'additions en instance.

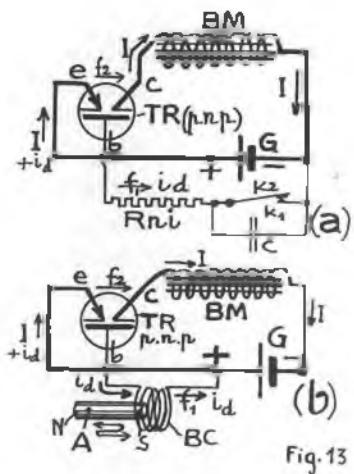


Fig. 15. — Pendulette électronique (brevet n° 1.090.564)
BC: bobine engendrant le signal d'entrée d'un transistor;
BM: bobine attirant l'aimant A.

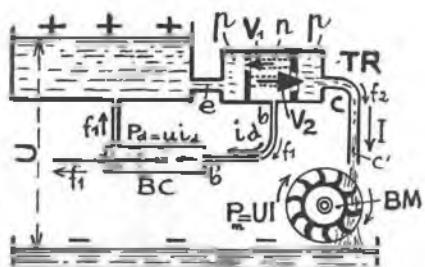


Fig. 14. — Modèle hydraulique
(Le déplacement f_1 engendre une dépression en n et les deux valves V^1 et V^2 s'ouvrent simultanément en permettant le débit principal I).

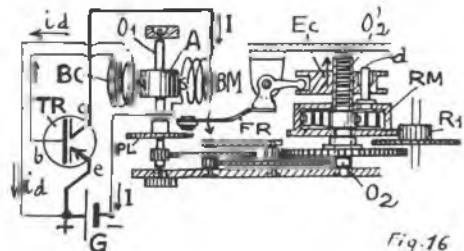


Fig. 16. — Remontage automatique à couple constant, par le moteur A, BC, BM.
Ce moteur est freiné par la lame flexible FR dès que le ressort RM est remonté à fond. R1 actionne un mécanisme horaire classique dont la précision peut être très grande, le couple moteur étant régularisé.

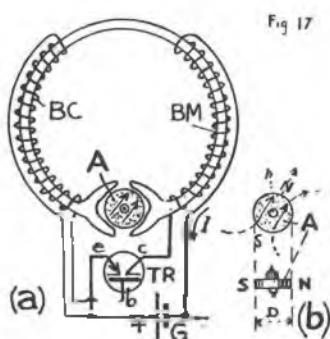


Fig. 17. — Micromoteur rotatif (brevet N° 1.092.411)
(A rotor d'un diamètre D = 5mm. Dans le transistor TR, le volume des cristaux actifs p-n-p est de l'ordre du millimètre cube).

incomparablement plus faible que celle qui intervient dans le dispositif de commande directe (fig. 10).

Dès que le courant i_d s'établit, la résistance des cristaux comprise entre l'émetteur e et le collecteur c du transistor devient très faible et permet l'attraction de l'électro-aimant BM .

L'interrupteur périodique est réalisable au moyen d'une lamelle K 2 très souple et l'on peut même employer un contact électrique légèrement frottant. Pour éviter les effets de vibrations accidentelles, on peut monter entre K 1 et K 2 un shunt capacitif C qui maintient pendant les impulsions le passage continu des courants i_d et I .

VII. — SUPPRESSION DES INTERRUPTEURS MOBILES.

Bien que les étouffeurs d'étincelles et les relais électroniques soient efficaces, il serait très intéressant de pouvoir assurer la distribution des impulsions motrices en évitant les interrupteurs.

Pour atteindre ce résultat, on peut envisager l'utilisation de détecteurs électriques ou électromagnétiques, analogues aux « pick-ups » bien connus, capables d'engendrer un signal électrique dépendant de la position d'un organe mobile tel qu'un balancier ou une fourchette d'échappement à ancre. A l'aide d'un amplificateur du type représenté en fig. 4 C (5), il serait possible de moduler le débit de la pile dans un enroulement moteur approprié.

Ce dispositif, toutefois nécessiterait un appareillage de sélection encombrant et coûteux, difficilement applicable aux appareils horaires de faible volume. Le courant de sortie pourrait être modifié par diverses causes perturbatrices.

Pour aboutir à une solution industrielle convenant à la chronométrie, il faut simplifier les montages utilisés en radiotéchnique. Il est indispensable, de plus, d'éviter l'influence des variations de la température ambiante, sur la résistance des cristaux semi-conducteurs en série avec les enroulements moteurs agissant sur les balanciers.

Dans cet ordre d'idées, le schéma b de la fig. 13 montre le principe d'une commande électronique applicable à certains échappements électromagnétiques.

(5) Article précédent, n° 27 de la M.F.

Un petit aimant mobile A induit un faible signal dans un enroulement sans fer BC . Ce signal est formé par un courant alternatif très faible puissance. Une partie i_d de l'alternance dirigée en sens f rend conducteur le transistor TR et débloque instantanément le circuit d'alimentation de l'enroulement moteur BM . On peut faire passer dans cet enroulement un courant de travail peu influencé par la température ambiante car, lorsque i_d est établi, la résistance des cristaux dans le sens de e à c est très faible devant la résistance élevée de la bobine BM . Le transistor joue, en somme, le rôle d'un bon contact métallique à fermeture et à rupture brusques, mais il est constitué par des cristaux immobiles p.n.p. d'un très faible volume.

En fig. 14 nous avons représenté un modèle hydraulique qui, malgré ses imperfections évidentes, peut faciliter, croyons-nous, la compréhension intuitive du fonctionnement.

La fig. 15 représente un exemple d'entretien électronique (pendulette Ato à balancier rectiligne, actionné une fois par période par le dispositif fig. 13 b).

Il est à noter que la compensation thermique globale des balanciers ferromagnétiques peut être parachevée par des shunts spéciaux *Imphy* (ferro-nickels à bas point de Curie) disposés pour corriger dans le sens convenable les périodes d'oscillations (6).

VIII. — MICROMOTEUR A COURANT CONTINU SANS COLLECTEUR.

Le dispositif fig. 13 b permet aussi de réaliser des micromoteurs tournant à sens unique.

Comme l'indique le croquis schématique fig. 16, le rotor du moteur peut être formé par un petit aimant cylindrique A présentant des pôles magnétiques alternés tels que N et S . Ces pôles défilent devant les bobines fixes BC et BM et l'amplificateur à cristal TR peut délivrer un courant intermittent relativement puissant qui exerce des impulsions motrices sur le rotor aimanté (7).

(6) Communication à l'assemblée de la Société Chronométrique de France, le 5 juin 1955.

(7) Ce moteur a été présenté en marche au Congrès international de 1954 et à l'exposition de la Société de Physique en 1955.

Les moteurs électroniques peuvent être utilisés de diverses façons. Ils s'appliquent notamment au remontage d'un ressort de bâillet RM actionnant un mécanisme horaire classique (voir fig. 16). Le couple transmis à la roue d'échappement peut être régularisé par un dispositif de débrayage ou par un frein automatique tel que celui de Batault (brevet n° 405.356, 1909). Comme la source d'électricité ne risque pas de faire défaut, l'énergie accumulée dans le ressort intermédiaire peut être très réduite.

On remarquera que dans le dispositif fig. 16, les variations de la source d'énergie au-dessus d'une certaine limite n'ont aucun effet sur le couple agissant sur l'échappement. Ce remontoir électro-mécanique est donc applicable aux montres de bord munis des organes réglants classiques susceptibles de donner la plus grande précision atteinte actuellement (précision des chronomètres de marine comportant une fusée et un échappement libre à détente).

Le remontage d'un micro-bâillet de montre pourrait être assuré de façon analogue par le moteur miniature (fig. 17) fonctionnant continuellement ou par intermittence.

L'étude théorique et expérimentale de ce système a montré qu'il est avantageux de répartir les enroulements BC et BM sur de longs noyaux en ferro-nickels de très haute perméabilité (« Mumetal » ou « Anhyster D »). La section de ces noyaux peut être très faible (de l'ordre du mm^2) car on peut utiliser un rotor bipolaire A très léger en forme de disque constitué par une matière hypercoercitive telle que le « Fercolite » ou le nouvel alliage ductile CO-Pt.

Pour obtenir la rotation au moyen d'un courant périodique très faible, il est indispensable de donner aux épanouissements polaires du stator un profil spécial: il faut qu'en l'absence de courant, la perméance du circuit magnétique reste rigoureusement constante quelle que soit la position angulaire du rotor aimanté A. Dans ces conditions, un rotor bien équilibré tourne au moyen d'impulsions électromagnétiques très réduites et le fonctionnement est comparable à celui des moteurs galvanométriques à flux constant (moteurs du type O'K, connus pour leur excellent rendement).

IX. — MOTEURS PUISSANTS CONTRÔLÉS PAR DES VIBRATEURS SANS CONTACTS.

Le premier remontoir de L. Breguet (fig. 7) présente une propriété remarquable: les aiguilles sont directement actionnées par l'électro-aimant B qui se comporte comme un servomoteur. La tension du petit ressort ri est maintenue constante comme dans les « remontoirs d'égalité ».

On voit qu'un électromoteur très puissant B pourrait actionner de lourdes aiguilles et il n'en résulterait aucune modification de la valeur des impulsions exercées par l'échappement à ancre. Le seul point faible est la détérioration de l'interrupteur K 1 - K 2.

Les relais statiques à transistor permettent actuellement de réaliser dans de bonnes conditions la géniale invention de L. Breguet car le contact défectueux du dispositif fig. 7 pourrait être facilement remplacé par une commande électronique. On peut même envisager l'emploi de capteurs-déTECTeurs sans réaction sur le balancier régulateur (capteurs à capacité variable, à effet Hall, à écran mobile interrompant le couplage de deux bobines fixes, etc...).

Les « transistors de puissance » récemment mis au point peuvent permettre d'alimenter les compteurs chronométriques de gros volume employés en horlogerie monumentale.

Le dispositif fig. 13 b s'applique aussi aux vibrateurs rapides (par exemple aux diapasons de 25 à 500 Hz) et peut délivrer, après amplification, une puissance suffisante pour assurer soit la marche d'un moteur synchrone usuel, soit l'asservissement de vitesse d'un moteur industriel asynchrone (8). Ainsi les problèmes posés par le chronométrage, l'enregistrement des phénomènes très rapides, la commande des horloges imprimantes, les déclenchements automatiques échelonnés dans le temps... pourront certainement être résolus.

(8) Divers dispositifs de synchronisation et d'asservissement ont été décrits par M. J. Dietrich, dans ses communications au Congrès International de Paris (1953) et à l'assemblée de la Société Chronométrique de France (juin 1955). Les transformations de mouvements alternatifs en mouvements continus d'un seul sens peuvent être opérées par les échappements magnétiques réversibles.

ment recevoir de nouvelles solutions avantageuses grâce aux qualités des amplificateurs modernes.

X. — CONCLUSIONS.

La découverte des amplificateurs miniatures de faible puissance permet-elle d'annoncer dès maintenant une prochaine transformation de tous les appareils horaires?

Il est encore impossible de répondre à cette question car le prix élevé des transistors au ger-

manium ne permet pas la production massive des relais électroniques à semi-conducteurs.

L'accélération actuelle des progrès scientifiques et techniques autorise cependant la prévision d'un abaissement considérable du coût des triodes à cristal. Dès que ce résultat sera obtenu, l'industrie horlogère disposera d'un merveilleux moyen de perfectionnement applicable à tous les types d'instruments chronométriques.

Marius LAVET.



ERRATUM

Dans l'article précédent de Marius Lavet publié dans le N° 27 p. 22 de notre revue une ligne sautée a rendu le passage inintelligible. Nous le rétablissons ci-dessous en priant nos lecteurs de bien vouloir nous excuser de cette omission :

« La loi donnée par Ohm dès 1820 ($I = U/R$) exprime que le courant I , ou quantité d'électricité transportée par seconde, est proportionnel à la tension U et inversement proportionnel à la résistance R du conducteur (résistance que l'on exprime en ohms). »