equation (3), but the methods mentioned above have been the most successful numerically hitherto.

From the similarity of the diagrams representing the regions of stable and unstable movement of equations (3) and (5), we may expect that all the boundary lines between these regions also for equation (2) cut the α^2-axis for large values of α^2 at points corresponding to

$$\alpha = n + \tfrac{1}{2},$$

where $n = 1, 2, 3$, etc.

Finally, these boundary lines tend to straight lines under 45° in the second quadrant of fig. 2, the stable regions being rather large *below* the 45° line in the first quadrant and very small relatively to the unstable regions *above* and to the left of the aforesaid line. Thus there seems to be little doubt that the general behaviour of the solutions of the Mathieu equation will be similar to the behaviour, fully described above, of the case where the ripple is rectangular instead of sinusoidal.

Bibliography.

(1) Whittaker & Watson, 'Modern Analysis,' 2nd ed. p. 405.
(2) Lindstedt, *Mémoires de la Académie de St. Petersbourg*, xxi. No. 4.
H. Poincaré, 'Méthodes nouvelles de la Mécanique céleste.' ii. p. 229.
F. Tisserand, 'Traité de Mécanique céleste,' iii. p. 1.
3) A. Stephenson, Proc. Manchester Phil. Soc. lii. p. 8 (1908).
Balth. van der Pol, *Physica*, 1925, p. 157.
Lord Rayleigh, 'Theory of Sound,' i. p. 82 (1926).
G. Hamel, *Math. Ann.* lxxiii. p. 371 (1912).
(4) E. Meissner, 'Schweizer Bauzeitung,' 1918, p. 95.
(5) Lord Rayleigh, 'Theory of Sound,' i. p. 81 (1926); Scientific Papers,' ii. p. 188.
(6) Lord Rayleigh. 'Scientific Papers,' iii. p. 1.
(7) R. Carson, Proc. Inst. Rad. Eng. 1922, p. 62.
(8) H. Armstrong, Proc. Inst. Rad. Eng. 1922, p. 244.
9) *E. g.*, C. L. Charlier, 'Mechanik des Himmels.' i. p. 22.
H. Poincaré, 'Leçons de Mécanique céleste,' ii.
(10) Lord Rayleigh, 'Scientific Papers,' iii. p. 10.
Balth. van der Pol, 'Experimental Wireless' (1926).
(11) E. Mathieu, 'Cours de Mathématique physique,' p. 122 (1873).
(12) M. J. O. Strutt, *Ann. d. Phys.* lxxxiv. (1927).
(13) B. Sieger, 'Dissertation Würzburg' (1909).
(14) A. Liaponnoff, *Annales Faculté de Sciences de Toulouse*, 2nd ser. ix. p. 406.
(15) F. Tisserand, *Bulletin Astronomique*, ix. p. 102 (1892).
(16) H. Poincaré, 'Méthodes nouvelles de la Mécanique céleste, i. p. 67.
(17) P. Humbert, 'Fonctions de Mathieu et de Lamé,' p. 35 (1926. Gauthiers-Villars).
E. G. C. Poole, Proc. London Math. Soc. xx. p. 374 (1922).

Physical Laboratory of the
Philips' Glowlampworks Ltd. Eindhoven.

September 20th. 1927.

LE BATTEMENT DU CŒUR CONSIDÉRÉ COMME OSCILLATION DE RELAXATION ET UN MODÈLE ÉLECTRIQUE DU CŒUR (1)

par le Docteur BALTH. VAN DER POL et M. J. VAN DER MARK

(S. A. *Philips* à Eindhoven, Hollande)

Monsieur le Président, Messieurs,

« J'apprécie très vivement l'honneur de parler devant vous ce soir, sous les auspices de la société des Amis de la T. S. F., de la Société française des Electriciens et de la Société de Biologie. Je dois cet honneur d'abord à l'amicale invitation de M. René Mesny, secrétaire général de la société des amis de la T. S. F., dont les travaux sont bien connus et vivement admirés aux Pays-Bas, et au jugement duquel j'attache personnellement le plus grand prix. C'est lui également qui a bien voulu se charger d'intéresser à mes travaux la célèbre Société française des Electriciens dont je remercie le président M. Imbs d'avoir bien voulu accorder son patronage à cette séance. Enfin la présence ici du Bureau et des membres de la société de biologie est due à l'intérêt que l'éminent maître de la science cardiaque, M. le professeur Vaquez a bien voulu porter à un exposé sommaire des premiers résultats obtenus par nous sur ce sujet ».

1. — *Oscillations sinusoïdales.*

La forme la plus commune des mouvements oscillatoires que l'on rencontre d'habitude est caractérisée par son allure sinusoï-

(1) Conference donnée par M. Balth. van der Pol, 24 mai 1928 dans la Salle de la Société de Géographie, 184, boulevard Saint-Germain, sous la présidence de M. le Général G. Ferrié, à l'invitation de la Société des Amis de la T. S. F., de la Société Française des Electriciens et de la Société de Biologie.

dale. Comme exemples nous pouvons citer le mouvement d'un pendule, le mouvement des branches d'un diapason, le mouvement d'une corde tendue. Mais nous trouvons ces oscillations sinusoïdales non seulement dans des systèmes mécaniques, mais aussi très fréquemment dans des systèmes purement électriques et également dans des systèmes électro-mécaniques. Un exemple caractéristique d'oscillations sinusoïdales purement électriques est donné par les courants de haute fréquence de la radio-télégraphie et de la radio-téléphonie ; d'autre part, les courants alternatifs industriels produits par un alternateur tournant forment un exemple typique d'oscillations électro-mécaniques du type sinusoïdal.

Etant donné que les équations différentielles qui régissent le mouvement de particules matérielles ressemblent très souvent, même jusque dans leurs détails aux équations qui régissent le mouvement de l'électricité dans les conducteurs, une analogie profonde existe entre beaucoup d'oscillations produites électriquement et celles de particules matérielles. Par exemple, l'équation différentielle décrivant les petites oscillations d'un pendule libre est exactement identique à celle qui décrit les variations du courant ou de la différence de potentiel dans un circuit oscillant composé d'une bobine de self-induction L et de résistance r connectée en série avec un condensateur de capacité C. De fait, cette équation est

$$L\frac{d^2v}{dt^2} + r\frac{dv}{dt} + \frac{1}{C}v = 0,$$

ou

$$\ddot{v} + \alpha\dot{v} + \omega^2 v = 0 \qquad (1)$$

où l'on a posé

$$\alpha = \frac{r}{L},$$

$$\omega^2 = \frac{1}{CL}$$

Il est bien connu que, lorsque

$$\alpha^2 << \omega^2 \qquad (2)$$

c'est-à-dire lorsque la résistance du circuit est très petite, la décharge du condensateur est sinusoïdale amortie, et sa fréquence angulaire ω (1) est donnée par la formule classique

$$\omega^2 = \frac{1}{CL}. \qquad (3)$$

(1) $\omega = 2\pi n$ où n est la fréquence, c'est-à-dire le nombre d'oscillations complètes par seconde.

Nous voyons, par conséquent, que la fréquence de ces oscillations électriques d'un type courant est déterminée par le produit d'une *self inductance* par une *capacité*.

Exactement de la même manière, nous trouvons pour la fréquence angulaire ω d'un pendule :

$$\omega^2 = \frac{ml^2}{mgl} = \frac{l}{g}, \qquad (4)$$

où m = masse du pendule ;
l = longueur du pendule ;
g = accélération due à la pesanteur.

Comme nous l'avons dit plus haut les oscillations que nous venons de décrire ont une force sinusoïdale mais de plus, ces oscillations décroissent graduellement avec le temps, autrement dit sont *amorties*. Cet amortissement est dû à la dissipation de l'énergie : dans le cas électrique par la résistance ohmique dans le cas mécanique par la résistance de frottement dans le support du pendule.

Mais en électrotechnique et particulièrement dans le domaine de radio-télégraphie nous avons à notre disposition des résistances d'un caractère négatif. Au lieu de dissiper de l'énergie, ces résistances négatives peuvent *fournir* de l'énergie. Il est évident par conséquent qu'elles ne se présentent que dans les systèmes qui contiennent une source d'énergie. Si dans un circuit électrique oscillant tel que celui que nous avons décrit nous insérons une résistance négative au lieu d'une résistance positive, les oscillations du système auront tendance à augmenter indéfiniment en amplitude, au lieu de diminuer comme cela serait le cas si nous avions une résistance positive. Le récepteur radio-télégraphique bien connu dit « à réaction » est un exemple typique d'un pareil circuit oscillant à résistance négative, car lorsque la réaction est trop poussée, le système se met à osciller spontanément, des oscillations infinitésimales augmentant graduellement jusqu'à une amplitude finie sous l'action de cette résistance négative. De même, les oscillations électriques produites par un transmetteur à arc ont lieu grâce à la résistance négative de l'arc.

L'équation différentielle d'un pareil système serait par conséquent analogue à l'équation (2) mais le signe de la résistance serait changé et l'équation deviendrait par conséquent :

$$\ddot{v} - \alpha\dot{v} + \omega^2 v = 0. \qquad (2a)$$

Toutefois cette augmentation de l'amplitude ne peut pas continuer indéfiniment, et par conséquent il y aura toujours dans le système une cause quelconque qui rendra la résistance de nouveau positive, lorsque l'amplitude aura dépassé une certaine valeur. Par suite la résistance r du système et également l'expression $\varkappa$ doivent être une fonction de l'amplitude telle qu'elle change de signe lorsque l'amplitude est supérieure à une certaine valeur constante déterminée par la nature du système.

Par suite pour pouvoir décrire l'augmentation d'amplitude de ces oscillations sinusoïdales et leur limitation à une amplitude déterminée, nous devrons remplacer l'équation (2a) par la suivante

$$\ddot{v} - \varkappa(1 - v^2)\dot{v} + \omega^2 v = 0 \qquad (5)$$

car de la sorte $\varkappa$ a été remplacé par $\varkappa(1 - v^2)$ et cette expression change de signe dès que v^2 devient supérieur à l'unité, cette der-

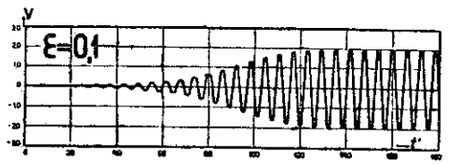

Fig. 1. — Représentation graphique de la solution de l'équation (5) avec la condition $\varepsilon = \alpha/\omega = 0{,}1$. Dans ce cas l'équation représente une oscillation sinusoïdale d'amplitude augmentant d'abord graduellement et atteignant finalement une valeur constante.

nière valeur étant d'ailleurs choisie arbitrairement et dépendant seulement des unités employées.

Comme nous l'avons dit plus haut la condition pour que des oscillations sinusoïdales s'établissent est

$$\alpha^2 << \omega^2$$

et un exemple caractéristique de solution de l'équation (5) lorsque

$$\alpha^2 = \frac{1}{100}\,\omega^2$$

est donné dans la figure 1, où l'on voit clairement l'augmentation de l'amplitude qui finalement conserve une valeur constante.

2. — *Oscillations de relaxation.*

Il est intéressant de rechercher quelle peut être la solution de l'équation (5), lorsque la condition

$$\alpha^2 << \omega^2 \qquad (2)$$

est remplacée par

$$\alpha^2 >> \omega^2. \qquad (6)$$

Rendons-nous compte d'abord du sens physique de la condition (6). Ici la résistance initiale, tout en étant négative, est tellement grande que, si elle était constante et indépendante de l'amplitude, le *système serait très fortement apériodique*. Et de même qu'un système apériodique à résistance positive tend toujours vers zéro d'une manière apériodique, notre système apériodique à résistance négative aurait toujours tendance à s'éloigner de zéro, également d'une manière apériodique, c'est-à-dire sans aucune espèce d'oscillations. Mais aussitôt que la valeur instantanée de v^2 devient supérieure à l'unité, le caractère négatif de la résistance cesse d'avoir lieu et la résistance devient positive. Par suite, l'élongation à ce moment tend de nouveau à décroître apériodiquement.

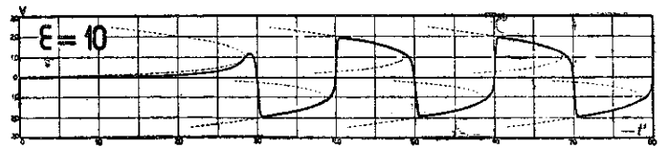

Fig. 2. — Représentation graphique de la solution de l'équation (5), mais cette fois avec la condition $\varepsilon = \alpha/\omega = 10$. Dans ce cas, l'équation représente une « oscillation de relaxation » caractérisée entre autre par sa forme qui diffère considérablement d'une courbe sinusoïdale. On voit que des sauts brusques se produisent périodiquement.

Par conséquent avec la condition (6) le système a tendance tout d'abord à sauter de la valeur zéro à une valeur positive, décroissant ensuite graduellement, puis tout à coup de sauter à une valeur négative et ainsi de suite.

Effectivement une solution de l'équation (5) avec la condition

$$\alpha^2 = 100\omega^2$$

est représentée dans la figure 2. D'une étude analytique plus approfondie de l'équation (5) avec la condition (6) faite par l'un des auteurs de cette note (1), il résulte que la période T_{rel} de ces dernières oscillations est donnée approximativement par

(1) Balth. van der Pol, *Phil. Mag.*, **51**, 978 (1926), *Jarhbuch der drahtlosen Telegr.*, **28**, 178 (1926), **29**, 114 (1927).

$$T_{r\,l} = \frac{\omega^2}{\alpha} = Cr \qquad (7)$$

au lieu de

$$T_{sin} = 2\pi\sqrt{CL} \qquad (8)$$

comme dans le cas sinusoïdal pour lequel nous avions

$$\alpha^2 << \omega^2. \qquad (2)$$

Par suite la période de ces nouvelles oscillations dans ce cas électrique particulier est déterminée par la *durée de décharge d'un condensateur*, que l'on appelle parfois une durée de *relaxation*, et par suite nous appellerons ce type d'oscillations des *oscillations de relaxation*.

Bien que les oscillations de relaxation aient été découvertes tout d'abord de la manière que nous venons de décrire, on voit bien qu'elles doivent être rencontrées dans toutes sortes de domaines naturels. D'une manière générale, lorsque nous rencontrons dans la nature un phénomène périodique dont la période n'est pas rigoureusement constante et lorsque cette période n'est pas déterminée par une masse et une élasticité (ou par une self-inductance et une capacité comme dans l'exemple électrique), mais que la période est donnée par une durée de relaxation sous une forme quelconque, nous devons penser que nous avons affaire à une forme quelconque d'oscillations de relaxation dont le type général a été donné plus haut sous forme mathématique. Car, il y a des durées de relaxation de bien des types différents, tels que le temps nécessaire à un courant pour atteindre sa valeur finale dans un système contenant une self-inductance, une durée de diffusion, une durée d'établissement de température, une durée de combinaisons chimiques et toutes espèces de durées d'amortissement produisant cependant *une fois seulement* au cours d'une expérience particulière ; par exemple nous pouvons amener deux gaz au contact et constater qu'ils diffusent l'un dans l'autre, expérience dans laquelle la durée nécessaire à cette diffusion est du type que nous avons appelé durée de relaxation. Toutefois, ce phénomène se produit une fois seulement, et il est caractéristique des oscillations de relaxation que ce phénomène asymptotique se répète périodiquement. Il est évident que cette reproduction automatique périodique d'un phénomène typiquement apériodique est intimement liée à la présence d'une source d'énergie d'un type quelconque. Considérons par exemple *la harpe éolienne*, qui consiste en une corde tendue, contre laquelle le vent

souffle. Un examen détaillé montre que derrière la corde des tourbillons se forment alternativement vers la droite et vers la gauche et se propagent en s'éloignant de la corde, faisant place de cette manière à de nouveaux tourbillons qui se créent et s'éloignent de la même façon. Ainsi dans le cas d'une harpe éolienne comme dans celui du vent qui souffle dans les fils télégraphiques en produisant un son sifflant, la période du son produit est déterminée par une durée de relaxation et n'a absolument rien de commun avec la période naturelle de la corde vibrant d'une manière sinusoïdale. On peut citer beaucoup d'autres exemples d'oscillations de relaxation, telles que : le marteau pneumatique ; le grincement d'un couteau sur une assiette, un drapeau flottant au vent, le bourdonnement produit parfois par un robinet, le grincement d'une porte, la machine à vapeur à double effet avec un volant insuffisant, l'expérience de M. Janet sur une dynamo-série, le multivibrateur d'Abraham et Bloch (1), le multivibrateur à lampe bigrille (2), les étincelles périodiques obtenues en tournant une machine de Whimshurst, l'interrupteur de Wehnelt, la décharge intermittente d'un condensateur à travers un tube à néon (3), la réapparition périodique des épidémies, et des crises économiques, la variation périodique d'un nombre pair d'espèces d'animaux, vivant ensemble et certaines espèces servant d'aliments aux autres (4), le sommeil des fleurs, l'apparition périodique de pluies derrière une dépression, le frisson provenant du froid, la menstruation et finalement les battements du cœur (5). Dans tous ces exemples la fréquence de ces phénomènes périodiques n'est pas déterminée par le produit d'une élasticité et d'une masse, mais plutôt par une forme quelconque de durée de relaxation.

Le fait que la fréquence de ces phénomènes périodiques n'est pas rigoureusement constante est dû à ce qu'une durée de relaxation est déterminée notamment par une résistance d'un type quelconque et c'est un fait bien connu que des circonstances extérieures peuvent modifier bien plus aisément une résistance qu'une masse ou une élasticité.

(1) Abraham et Bloch, *Annales de Physique*, **12**, 237, 1919.
(2) Balth. van der Pol, *Phil. Mag.*, **51**, 991, 1926.
(3) Schallreuter, *Ueber Schwingungserscheinungen in Entladungsröhren* (Wieweg), 1923.
(4) Volterra, *Comptes rendus de l'Académie des Lincei*, 1926.
(5) Le point de vue d'après lequel des oscillations du cœur appartiennent au type des oscillations de relaxation a été pour la première fois exprimé il y a deux ans. Voy. Balth. van der Pol, *Phil. Mag.*, **51**, 992, 1926.

3. — *Propriétés des oscillations de relaxation.*

Deux des propriétés des oscillations de relaxation ont déjà été discutées plus haut, à savoir :

a) leur forme très différente de la forme sinusoïdale (elle est caractérisée par des sauts discontinus se produisant toutes les fois que le système devient instable, périodiquement par conséquent).

b) leur période qui est déterminée par une durée de relaxation.

Une troisième propriété non moins importante est la facilité avec laquelle des oscillations de relaxation se mettent en synchronisme avec un phénomène extérieur périodique agissant sur elles (1). Ceci peut s'expliquer de la façon suivante :

Supposons qu'un système exécutant des oscillations de relaxation soit construit de telle manière qu'en faisant varier l'un de ses paramètre, nous puissions changer sa période propre de relaxation dans un grand intervalle d'une façon bien déterminée, tout d'abord nous réglerons le système de manière qu'il oscille très rapidement et nous lui appliquerons une petite force extérieure périodique de la même fréquence que celle à laquelle oscille le système. Réduisant ensuite graduellement la période propre de relaxation du système, nous constaterons que celui-ci continue à osciller avec la période de la force extérieure, de sorte que le système se met automatiquement en synchronisme avec la force extérieure. Nous pouvons faire descendre la fréquence propre du système presque jusqu'au voisinage de l'octave inférieur sans qu'il cesse d'osciller en parfait synchronisme avec la force extérieure. Si nous continuons à réduire la période du système, sa fréquence saute tout à coup à une valeur qui est exactement *la moitié* de la fréquence de la force extérieure et le système se maintient automatiquement à cette nouvelle fréquence dans une gamme étendue. Une nouvelle réduction de la fréquence propre du système toujours sans toucher à la fréquence de la force extérieure, fait osciller tout à coup le système sur le troisième *sousharmonique* de la force appliquée, où il se maintient de nouveau dans une gamme étendue, etc... Il nous a été possible de prolonger cette expérience de *démultiplication de fréquence* jusqu'au rapport de 200 : 1. L'analogie avec un blocage partiel du cœur sera évident dans un instant. Les résultats d'expériences semblables faites avec les oscillations de relaxation produites par un tube à néon combiné avec une résistance et une capacité sont donnés dans la figure 3, où la capacité du système est portée en abscisses et la période de l'oscillation de relaxation en ordonnées, la ligne pointillée donne la relation entre ces deux qualités en absence d'une force électromotrice extérieure, et est approximativement une ligne droite ($T = Cr$), tandis que la ligne brisée indique la fréquence avec laquelle le système oscille sous l'influence de la force électromotrice périodique extérieure.

(1) Balth. van der Pol et J van der Mark, Frequency demul iplication, *Nature*, sept. 10, 1927.

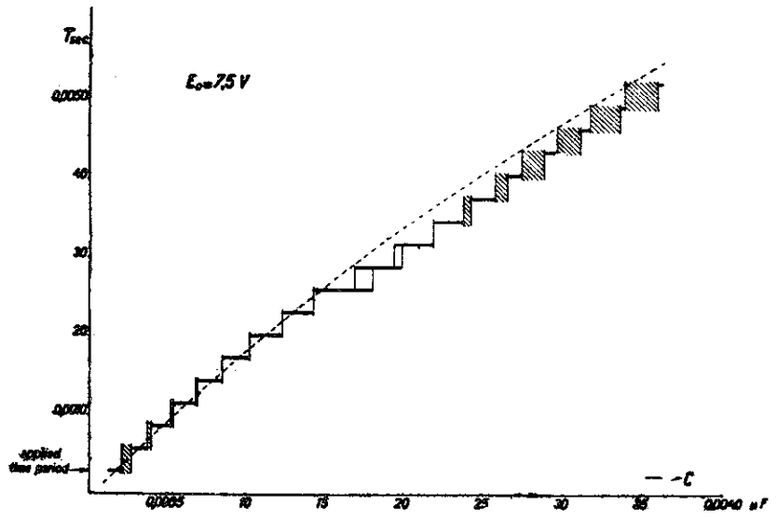

Fig. 3. — Un exemple de *démultiplication de fréquence*. Le système de relaxation répond successivement à différents subharmoniques (harmoniques inférieurs) de la force électromotrice alternative appliquée.

Le fonctionnement de certains instruments à vent peut être expliqué de la même façon. Par exemple, dans le cas d'une flute, l'air soufflant contre l'embouchure produit une oscillation de relaxation du type éolien ; ce système est couplé d'une manière serrée avec le tuyau qui peut osciller seulement d'une manière sinusoïdale et qui peut réagir sur l'oscillation de relaxation. On peut donc dire que dans ce cas l'entretien de la vibration est déterminé par une oscillation de relaxation alors que le couplage serré d'un système sinusoïdal avec le système à relaxation, fait que la fréquence est déterminée dans ce cas par le système sinusoïdal.

Un autre exemple de la facilité avec laquelle une oscillation de relaxation peut être synchronisée par l'effet d'une petite force périodique extérieure est donné par le cas que nous avons observé d'un interrupteur de Wehnelt qui tout d'abord fonctionnait irrégulièrement, mais qui tout à coup a donné des interruptions très régulières d'un courant continu, aussitôt que l'on a superposé un faible courant alternatif au courant continu, l'énergie alternative ainsi fournie étant très petite vis-à-vis de l'énergie du courant continu.

4. — *Modèle dynamique schématique du cœur.*

Dans l'application de la théorie des oscillations de relaxation aux battements du cœur, nous considérerons celui-ci comme un système à trois degrés de liberté : *le sinus*, *l'oreillette* et le *ventricule*. Etant donné que normalement les deux oreillettes battent exactement en synchronisme et qu'il en est de même des deux ventricules, nous parlerons dans ce qui suit de *l'*oreillette et *du* ventricule. Etant donné que nous considérons le cœur comme ayant trois degrés de liberté seulement, il est évident que nous excluons dès le début tous ces mouvements du cœur qui, exprimés dans un langage mathématique, ne peuvent être décrits que par des équations aux dérivées partielles. Par exemple, nous ne pourrons pas retrouver la vitesse finie de propagation d'une contraction dans la paroi du cœur. Nous ne considérons pas davantage le « flutter », ni la fibrillation puisque ces phénomènes sont en liaison directe avec des ondes progressives et des ondes stationnaires.

Retournant à notre modèle du cœur qui ne possède que trois degrés de liberté seulement, nous considérons chacun d'eux comme étant capable d'osciller par lui-même suivant des oscillations de relaxation, chacun des trois systèmes ayant sa période propre particulière. De plus, un couplage existe entre le sinus et l'oreillette, le premier organe agissant sur le second. Un second couplage existe entre l'oreillette et le ventricule, couplage qui se trouve réalisé par le moyen du *faisceau de His*.

Dans un cœur normal, les deux couplages, dont nous venons de parler, présentent cette particularité qu'ils transmettent une excitation dans *une* direction seulement, c'est-à-dire du sinus à l'oreillette, et de l'oreillette au ventricule respectivement, ces couplages sont en d'autres termes, dans le cœur normal, d'un caractère uni-

directionnel. Dans le modèle électrique que nous allons décrire, ces deux couplages sont par suite représentés par deux lampes triodes, dont la fonction n'est nullement d'amplifier, mais qui sont seulement insérées dans le but de fournir un couplage unidirectionnel ; on sait, en effet, qu'une modification du potentiel de grille d'une triode a un effet sur le circuit d'anode, mais qu'un changement fait dans le circuit d'anode n'a pas de répercussion sur le circuit de grille ou circuit d'entrée de la triode.

En considérant les battements du cœur comme des oscillations de relaxation, nous n'entrerons pas dans la question de savoir si une excitation électrique cause, ou précède, les contractions du cœur. Le seul objet de la présente note est de fournir une présentation d'ensemble logique du phénomène des battements du cœur considérés comme oscillations de relaxation. Les propriétés de ces oscillations qui ont été obtenues récemment nous permettent de considérer le rythme du cœur d'un point de vue nouveau, rendant compte de ces particularités d'une manière logique. Comme applications de cette théorie nouvelle, certaines anomalies du rythme cardiaque peuvent être prédites, qui pour autant que nous le sachions, n'ont pas encore été observées sur le cœur humain.

5. — *Description du modèle électrique du cœur.*

Pour obtenir un modèle du cœur conformément à la théorie qui vient d'être exposée, on pourrait employer des systèmes variés capables de produire des oscillations de relaxation. Un sytème très pra-

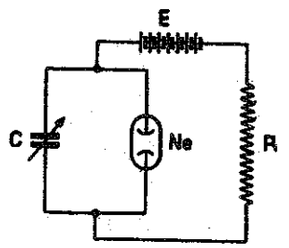

Fig. 4. — Un système capable de produire des oscillations de relaxation. Il consiste en une lampe à néon Ne, un condensateur d'environ 1 microfarad, une résistance R de l'ordre de 1 megohm et une batterie de 180 volts à peu près.

tique, et également particulièrement commode pour des démonstrations, est constitué par un tube à néon soumis à des décharges intermittentes Un pareil système est représenté fig. 4. E est une

batterie de 150 à 200 volts, R une résistance de l'ordre de 1 mégohm et C une capacité de l'ordre de quelques microfarads. Le fonctionnement de ce système est à peu près le suivant. Tout d'abord, le tube à néon est éteint et le condensateur *C* est chargé progressivement par la batterie *E* à travers la résistance *R* jusqu'à ce que la différence de potentiel entre les plaques du condensateur (auquel est connectée la lampe à néon *Ne)* atteigne le potentiel de décharge de la lampe à néon. A ce moment, une décharge a lieu tout à coup à travers le gaz de la lampe, courcircuitant le condensateur, qui se décharge en un temps très court à travers la lampe à néon. Il est évident qu'au cours de ce court intervalle de temps

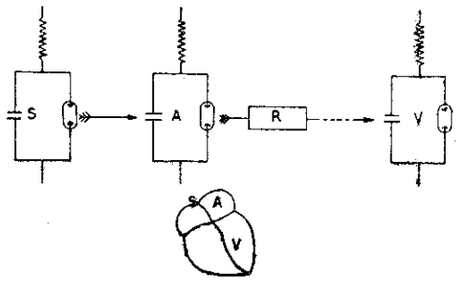

Fig. 5. — Représentation schématique du cœur par 3 systèmes de relaxation S (= Sinus), A (= Oreillette) et V (= Ventricule). R est un système à retardement représentant dans le modèle le temps fini nécessaire pour la transformation d'un stimulus par le faisceau de His.

la différence de potentiel entre les plaques du condensateur tombe à une valeur tellement basse que la décharge à travers le gaz ne peut plus avoir lieu. A ce moment, le chemin conducteur à travers *Ne* est soudainement interrompu, le condensateur se recharge alors lentement à travers la grande résistance *R* et le même cycle se répète indéfiniment. Comme la durée de charge du condensateur (en secondes) est donnée par le produit de la capacité *C* (en farads) et de la résistance *R* (en ohms) la période T_{rel} de cette oscillation de relaxation sera environ

$$T_{rel} = CR = 10^{-6}.10^{+6} = 1 \text{ seconde}$$

nous verrons par conséquent la lampe à néon donner un courté clat à peu près une fois par seconde.

Dans la figure 5, le cœur est représenté par trois systèmes semblables au précédent, le premier *S* représentant le sinus, le second

A l'oreillette et le troisième *V* le ventricule. Entre *A* et *V* le rectangle *R* représente un système à retardement qui reproduit le temps fini qu'il faut à une excitation pour être transmise à partir de l'oreillette jusqu'au ventricule en passant par le faisceau de His. Dans notre modèle électrique, ce retard est produit par l'action d'un quatrième tube à néon, qui a par conséquent pour fonction de faire en sorte que la systole ventriculaire se produise un peu plus tard que la systole auriculaire correspondante. Toutefois, n'importe quel autre système à retardement pourrait être employé et nous tenons à souligner le fait que le fonctionnement de notre

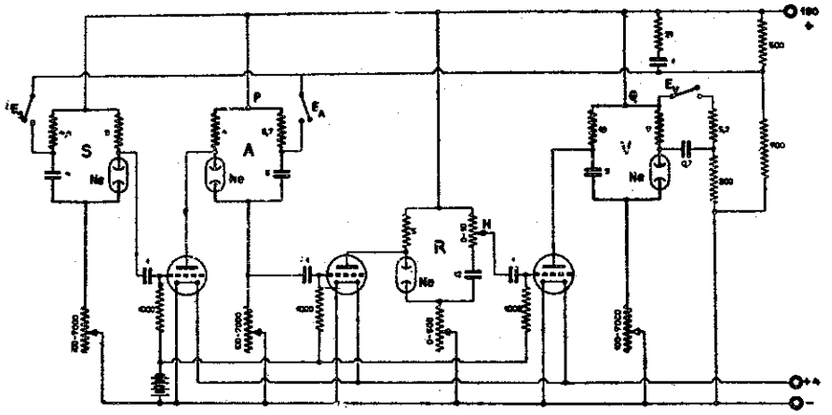

Fig. 6. — Schéma complet des connexions du modèle électrique du cœur.

modèle est indépendant du type du système employé pour produire ce retardement.

La figure 6 donne un schéma électrique complet de notre modèle.

Une photographie de l'instrument est donnée dans la figure 7 où l'on peut voir, que les trois tubes à néon *S.A* and *V* sont placés sur le devant de l'instrument. Chaque éclat correspond à l'activité de la partie respective du cœur.

Le fonctionnement du modèle se produit comme il suit: Le système *S* (le sinus) produit des oscillations de relaxation. A travers la première triode cette excitation est transmise d'une manière unidirectionnelle au second système de relaxation *A* (l'oreillette), l'excitation de l'oreillette est transmise d'une manière unidirectionelle

par la seconde triode au système à retardement R et de là à travers la troisième triode au ventricule V.

En faisant varier la résistance H nous pouvons agir sur le couplage entre l'oreillette et le ventricule et imiter de cette manière les belles expériences d'*Erlanger* et de *Frédéricq* dans lésquelles on pince d'une façon graduelle le faisceau de His. Nous pouvons également au moyen de trois clés donner respectivement au sinus, à l'oreillette ou au ventricule une petite impulsion électrique produisant de cette manière des extra-systoles du sinus de l'oreillette et du ventricule.

Voici une description plus détaillée du modèle :

Chaque système de relaxation est constitué, ainsi que nous l'avons indiqué plus haut, par une résistance variable en série avec un tube

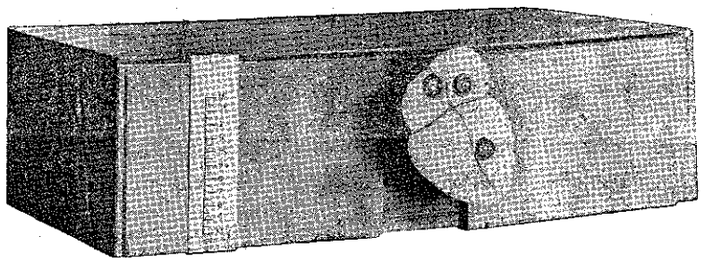

Fig. 7. — Vue extérieure du modèle.

à néon, ce tube étant shunté par un condensateur fixe. Une décharge du condensateur à travers le tube à néon, représente une contraction de l'une des parties dont le cœur est composé. La fréquence de chaque système est réglée au moyen de la résistance variable.

Le couplage entre deux systèmes de relaxation adjacents est obtenu au moyen d'une triode, de la manière suivante.

Prenons comme exemple le couplage sino-auriculaire. Dans le circuit de décharge du condensateur du sinus est intercalée une résistance se trouvant dans notre schéma au-dessus du tube à néon. L'une de ses extrémités est connectée au moyen d'un condensateur et d'une résistance de grille, à la grille de la triode. Le courant-plaque de cette triode doit passer par une résistance figurant au-dessus du tube à néon de l'oreillette. Au moment où le tube du sinus s'illumine, un courant passe dans sa résistance. Le potentiel à son extrémité inférieure

devient plus négatif, ce qui entraîne une diminution du potentiel de la grille reliée à cette extrémité et donc une diminution du courant-plaque de la triode. La différence de potentiel aux bornes de sa résistance anodique diminue donc aussi, ce qui signifie que la différence de potentiel aux bornes du tube à néon de l'oreillette augmente. Si à ce moment, la différence de potentiel aux bornes de ce tube n'est pas trop éloignée de son potentiel de décharge, le tube s'illumine. Nous voyons donc les deux tubes s'illuminer en même temps. Si la différence de potentiel n'est pas assez élevée, le condensateur de l'oreillette n'étant pas encore assez chargé (ce qui peut se produire si la fréquence propre de l'oreillette est trop basse), le potentiel de décharge ne peut être atteint. Il ne se produit rien, l'excitation arrivant pendant la *période réfractaire*. Dans notre cas, nous aurions donc un blocage sino-auriculaire.

Le système à retardement est composé dans ce modèle par un système de relaxation semblable, avec cette seule différence que le courant est trop fort pour que des oscillations puissent se produire. Un courant continu passe dans le tube à néon, le système est surchargé et on ne peut donc attendre aucun phénomène périodique. Si cependant on diminue suffisamment d'une manière quelconque, la différence de potentiel aux bornes du tube, la décharge lumineuse s'interrompt, mais le condensateur se recharge et quand le potentiel de décharge est de nouveau atteint, le tube s'illumine et comme auparavant une décharge continue se produit. Le temps qui s'écoule entre l'extinction et la nouvelle décharge est le retard que nous imposons à notre transmission et qui est égal au temps de relaxation RC, au temps de recharge du système. Une excitation extérieure ne produit donc qu'un seul battement. Cette excitation provient de l'oreillette et de nouveau par l'intermédiaire d'une triode. Le système à retardement est couplé lui-même au ventricule de la manière décrite ci-dessus. La résistance H est variable et il est donc possible d'augmenter et de diminuer l'excitation du ventricule, tout comme si l'on pinçait le faisceau de His.

Dans le schéma des connections nous voyons dans chaque système de relaxation encore une autre résistance, par exemple dans le système du sinus, la résistance reliant le condensateur à la borne de la source de haute tension. En appuyant sur le bouton E, nous déchargeons un condensateur à travers cette résistance, donnant

ainsi naissance à un stimulus sur le système de relaxation ; quelque chose d'analogue à la fonction de la résistance anodique dans le couplage décrit plus haut. Au moyen de ces clés (l'oreillette et le ventricule ont des résistances et clés semblables (E_A et E_V)) nous pouvons créer les différents types d'extrasystoles.

Le modèle entier ne comprend que des résistances et des capacités. Les nombres dans le schéma indiquent les valeurs de ces résistances et capacités, les résistances sont données en kilo ohms, les capacités en microfarads. Les résistances sont du type employé dans les appareils de T.S.F. Les triodes employées sont des tubes, Philips : de gauche à droite A425, A425 et 415. La tension employée est d'environ 180 volts. Les tubes à néon sont des lampes-témoins, Philips. Avec le modèle décrit, toutes les expériences qui vont suivre peuvent être exécutées.

Les électrocardiagrammes de notre modèle ont été pris de la manière suivante.

Dans les systèmes de relaxation représentant l'oreillette et le ventricule, on a intercalé des résistances aux places marquées P et Q.

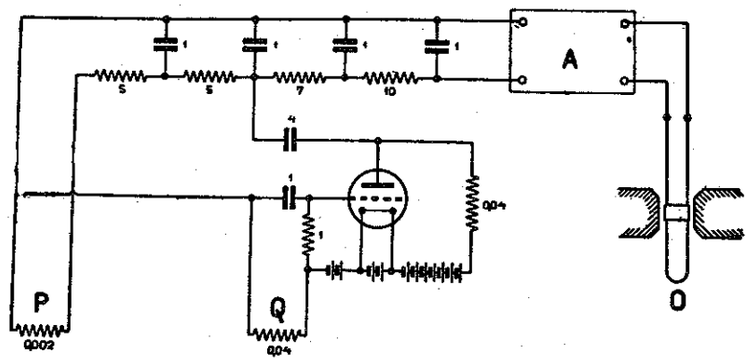

Fig. 8. — Circuit filtre employé pour obtenir les électrocardiogrammes du modèle.

Les différences de potentiel aux bornes de ces résistances ont été amplifiées et le courant d'anode de la dernière lampe de l'amplificateur passait dans un oscillographe. Pour obtenir un électrocardiogramme qui ait quelque ressemblance avec le cardiogramme d'un cœur normal, de mammifère nous avons modifié la forme des pointes de tension aux bornes de P et Q au moyen d'un circuit, représenté par la figure 8.

La pointe aux bornes de P, a été aplatie au moyen d'un filtre constitué par des résistances et capacités convenablement groupées, comme le montre la figure 8.

La pointe aux bornes de Q a été rendue un peu plus aiguë.

Ce résultat a été atteint au moyen d'une triode avec une tension négative élevée de sorte que le courant plaque normal soit nul et qu'il ne prenne naissance que lorsque le potentiel appliqué à la grille atteigne une certaine valeur.

Donc pendant une partie de la pointe de tension aux bornes de Q seulement, nous avons un courant dans le circuit-plaque de la triode. En réglant la valeur de la résistance anodique, la pointe peut être aussi élevée que nous le désirons. La résistance était si faible que la triode ne fonctionnait pas comme amplificateur.

La pointe aiguë obtenue ainsi, était légèrement aplatie au moyen d'une partie du même circuit employé pour la pointe en P. Nous avons obtenu après amplification un oscillogramme qui montre une certaine ressemblance avec le complexe QRS du cœur.

Il est clair que l'imitation de l'électrocardiogramme humain telle qu'elle a été décrite plus haut, n'est qu'une chose très secondaire et n'a aucune relation avec le but général de cette communication, c'est-à-dire l'explication des battements du cœur considérés comme oscillations de relaxation.

L'amplificateur A pouvait amplifier les fréquences très basses d'environ une période par seconde aussi bien que les fréquences plus hautes. L'oscillographe O était un oscillographe *Duddell* avec une fréquence naturelle de 2 000-3 000 par sec.

6. — *Expériences et mesures faites sur le modèle électrique.*

6*a*. — *Blocage du cœur.*

La figure 9 reproduit une série d'observations de l'illumination des deux tubes au néon A et V. L'illumination du tube à néon S n'a pas été enregistrée séparément, attendu qu'elle a lieu en synchronisme exact avec celle du tube-oreillette A. Sur la ligne supérieure nous voyons le fonctionnement normal du cœur, chaque systole auriculaire étant suivie peu de temps après par une systole ventriculaire. Dans le second diagramme le couplage électrique a été légèrement réduit, ce qui peut être comparé à l'effet d'un léger pin-

cement du faisceau de His. Quelques systoles ventriculaires manquent *irrégulièrement*. Comme la durée de transmission entre l'oreillette et le ventricule a été fixée une fois pour toutes par le système à retardement R, le retard graduellement croissant de la systole ventriculaire au début du blocage que l'on observe dans le cœur humain, ne peut pas être reproduit par le modèle tel qu'il est présenté ici. Toutefois, nous sommes convaincus que si ce système à retardement était remplacé par un autre consistant en un filtre

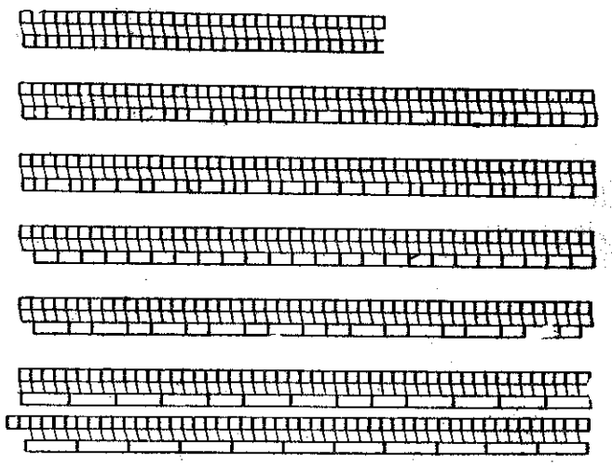

Fig. 9. — Représentation graphique des observations du battement du cœur artificiel en diminuant graduellement le couplage entre oreillette et ventricule. Le développement du blocage 2 : 1, 3 : 1 et 4 : 1 ainsi que du blocage complet est montré de façon très claire.

composé de condensateurs et de résistances et susceptible d'adoucir une onde à front raide, le retard graduel de la systole ventriculaire au début du blocage du cœur, serait également reproduit par notre modèle. Dans le troisième diagramme de la figure 9, le couplage électrique a été diminué encore davantage et de même dans le quatrième diagramme dans lequel nous observons un blocage du type 2 : 1. Ceci est un exemple caractéristique de la propriété de démultiplication de fréquence (ou synchronisation automatique d'une oscillation de relaxation sur le second harmonique inférieur — octave inférieur — d'une force extérieure périodique), que nous avons décrite dans le paragraphe 3. Dans le cinquième diagramme

de la figure 9 où le couplage a été réduit encore davantage (le faisceau de His pincé de plus en plus fort), nous trouvons un blocage alternatif 3 : 1 et 4 : 1 et enfin le dernier diagramme dans lequel

Fig. 10. — Exemple d'un électrocradiogramme du cœur artificiel. On peut voir facilement le sommet P et le complexe QRS. Le sommet T cependant ne s'y trouve pas, à cause de l'insuffisance des données actuelles relatives à son origine.

le couplage électrique a été entièrement supprimé, représente un blocage complet. Ici le ventricule n'est plus du tout couplé à

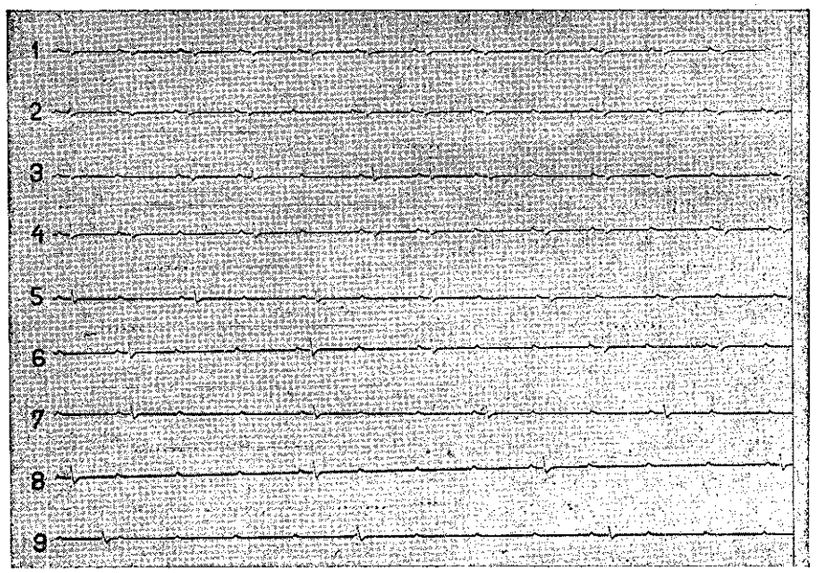

Fig. 11. — Electrocardiogrammes du cœur artificiel obtenus en diminuant graduellement le couplage entre les systèmes A et V (le pincement du faisceau de His). Le développement du blocage 2 : 1, 3 : 1 et 4 : 1 ainsi que du blocage complet est montré de façon très claire.

l'oreillette. En conséquence, l'oreillette est toujours commandée de la manière normale par le sinus (exemple de synchronisation automatique d'une oscillation de relaxation par une force électromotrice extérieure) mais l'oscillation de relaxation du ventricule est

entièrement libre, nullement contrôlée par l'oreillette et par conséquent se produit avec sa propre période de relaxation.

Une série d'électrocardiogrammes de ce cœur artificiel a été prise à l'aide d'un amplificateur à couplage par résistance et capacité spécial pour très basses fréquences. Les bornes de sortie de cet amplificateur étaient reliées à un oscillographe de Cambridge et le film du battement de cœur normal ainsi obtenu est reproduit dans figure 10. Les petites bosses sont dues aux systoles auriculaires et les pointes aiguës aux systoles ventriculaires. Les accidents P, Q, R, S sont par suite tous présents dans notre système, mais l'accident T manque évidemment d'une façon complète ; ceci provient de l'ignorance où l'on est (du moins à notre connaissance) de la cause qui produit le T dans les électrocardiogrammes, ce qui nous a empêché de représenter dans notre modèle cette partie du mouvement du cœur.

Dans la figure 11 nous reproduisons 9 films provenant d'une expérience analogue à celle dont la figure 9 nous a donné la représentation schématique au moyen des éclats de lampes à néon. Ici encore les particularités du blocage du cœur partiel ou total sont imitées par notre modèle et ces films présentent une ressemblance frappante avec les électrocardiogrammes relevés sur le cœur humain.

6*b*. — *Extra-systoles.*

Notre cœur battant à la manière normale, nous pouvons, à l'aide de la troisième clé E*v* de la figure 6, donner une petite impulsion électrique sur le ventricule. Si l'on donne cette impulsion, immédiatement après une systole ventriculaire, on observe que rien ne se produit. C'est que le ventricule est encore dans sa période *réfractaire*, le condensateur du système V n'est pas encore chargé à un potentiel tel que la force électromotrice qui lui est appliquée, puisse amener la différence de potentiel totale à atteindre le potentiel de décharge de la lampe à néon. Si nous répétons cette même expérience un peu après une systole ventriculaire, nous observons un éclat de la lampe V : c'est que le ventricule est maintenant sorti de sa période réfractaire. Lorsque cet éclat a eu lieu et que nous avons par conséquent produit une extra-systole ventriculaire, le condensateur se decharge à travers le tube à néon de la manière normale

jusqu'au potentiel pour lequel cesse la décharge à travers le gaz et nous retrouvons ainsi la fameuse loi *du tout ou rien :* une excitation, ou bien n'a aucun effet ou bien donne lieu à une systole complète. Si nous cherchons quelle est la grandeur de l'excitation nécessaire pour obtenir une extra-systole ventriculaire en fonction de la phase de l'excitation dans le cycle, nous trouvons que cette excitation décroît exponentiellement lorsque la phase augmente comme on pouvait s'y attendre, d'après ce fait que le condensateur se charge à travers la résistance suivant une loi exponentielle. La grandeur de

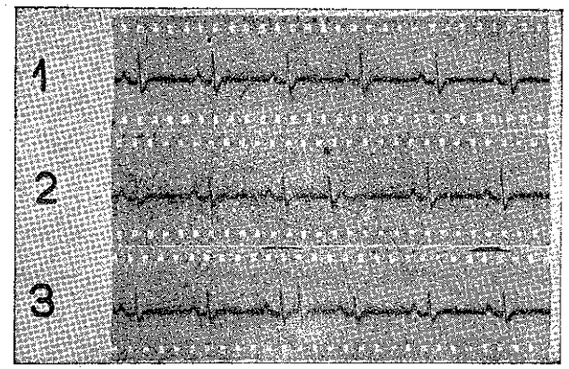

Fig. 12. — Extrasystoles ventriculaires.
1. Rythme normal ;
2. Extrasystole ventriculaire tardive ayant pour effet que le ventricule est encore réfractaire à l'arrivée de la première excitation suivante provenant de l'oreillette ;
3. Extrasystole ventriculaire se produisant *peu de temps* après une systole ventriculaire normale ; ici la période réfractaire du ventricule est terminée quand le premier stimulus normal suivant arrive de l'oreillette et on obtient donc une systole ventriculaire interpolée.

l'excitation E nécessaire pour produire une extra-systole en fonction du temps t compté à partir de l'époque de la dernière systole est par suite représentée par la formule

$$E = Ae^{-\frac{t_0}{CR}} - B$$

(où A et B sont des constantes et $A > B$) que l'on déduit immédiatement de la manière suivant laquelle un condensateur est chargé à travers une résistance. Sans aucun doute une loi analogue s'applique au cœur humain.

Considérons la figure 12 où le film No 1 représente de nouveau

un électro-cardiogramme de notre cœur artificiel battant d'une manière normale. Le film No 2 montre une extra-systole ventriculaire donnée peu de temps avant l'arrivée d'une impulsion provenant de l'oreillette. On voit que la systole auriculaire suivante trouve le ventricule encore dans sa période réfractaire, de sorte qu'il ne donne pas lieu à une systole ventriculaire normale. Au contraire, lorsque comme dans le film No 3, l'extra-systole ventriculaire a lieu plus tôt dans le cycle, la systole auriculaire suivante *produit un effet* et donne lieu à une systole ventriculaire normale, de sorte

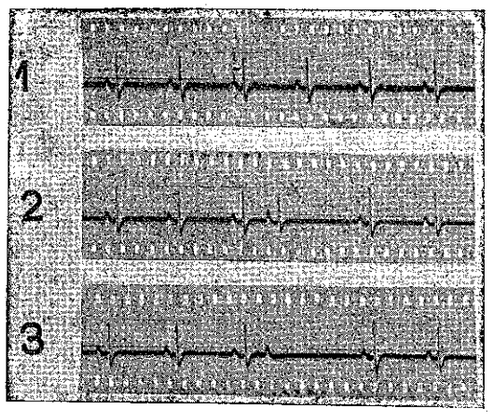

Fig. 13. — 1. Rythme normal ;
2. Extrasystole auriculaire (avec systole correspondante du ventricule) ;
3. Extrasystole auriculaire (le ventricule est encore dans sa période réfractaire).
Remarquez l'amplitude augmentée de la systole ventriculaire normale qui suit.

que nous nous trouvons dans le cas d'une systole ventriculaire *interpolée*.

De même dans la figure 13, le film 1 représente le cœur battant normalement. Dans le film 2, une extra-systole auriculaire est obtenue à l'aide de la seconde clé E_A de la figure 6. Ici encore l'extra-systole auriculaire est suivie après le temps normal par une systole ventriculaire, mais un intervalle de temps dit *période compensatrice* s'observe après cette extra-systole auriculaire, de telle sorte que la suivante se produit à l'époque normale rigoureusement déterminée par la fréquence du sinus. Le film 3 représente le même

cas, avec cette différence que l'extra-systole auriculaire a été causée un peu plus tôt que dans le film 2, par suite cette extra-systole trouve le ventricule encore dans sa période réfractaire et dans ces circonstances *n'est pas suivie* par une extra-systole ventriculaire ; le

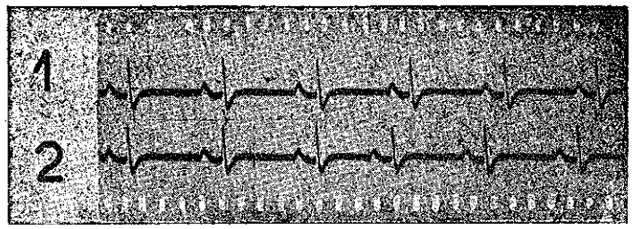

Fig. 14. — 1. Rythme normal ;
2. Extrasystole du sinus troublant le rythme entier du cœur

potentiel du condensateur V n'est pas encore assez élevé pour atteindre, même avec l'addition de la force électromotrice normale provenant du condensateur A, le potentiel de décharge du tube à néon V.

La figure 14, film No 1, donne les battements normaux du

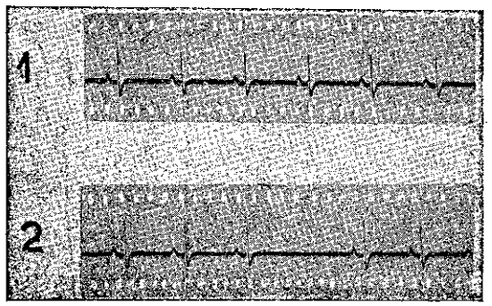

Fig. 15. — 1. Rythme normal ;
2. Blocage sino-auriculaire.

cœur, film No 2, montre les événements en cas d'une *extra systole du sinus*.

Il est clair, que le rythme original est perdu, comme dans le cœur humain.

Un cas caractéristique de *blocage sino auriculaire* est donné par la figure 15 où le premier film représente de nouveau le cœur bat-

tant normalement et le second le blocage en question. Finalement nous reproduisons figure 15, un électro-cardiogramme du cœur humain pris dans les trois dérivations normales (No 1, 2, 3), avec le même amplificateur spécial qui avait été employé dans les expériences sur le cœur artificiel et le même oscillographe de Cambridge, qui est plus rapide et donc plus exact qu'un galvanomètre à corde. Au moyen de ce même amplificateur spécial, nous pouvions obtenir le contrôle d'un tube à néon par le cœur humain. Une ou deux fois, cela dépendait de la tension aux bornes, le tube éclairait à chaque battement du cœur.

7. — *Considérations et suggestions finales ou nouvelles possibilités.*

L'analogie profonde existant entre le fonctionnement de notre modèle et le battement du cœur de mammifère ne laisse aucun doute que le point de vue exposé dans les paragraphes précédents et d'après lequel le battement du cœur serait une oscillation de relaxation ne soit juste. Pour cette raison, et sans même entrer dans des considérations détaillées relatives aux phénomènes nerveux, physiques et chimiques du cœur, on peut dire sans danger, que ce qui, somme toute détermine la période du cœur, est un temps de diffusion (une durée de relaxation). Comme nous l'avons dit plus haut, le modèle décrit ne représente qu'une approximation générale du fonctionnement du cœur et il pourrait être développé en différents sens, considérant alors le cœur comme ayant plus de 3 degrés de liberté.

De plus une réduction de la force électromotrice de la batterie connectée au modèle, diminue le tonus, et bientôt un point est atteint pour lequel notre cœur électrique ne bat plus du tout. Dans ces conditions le système se comporte exactement, du moins en ce qui concerne l'action d'un stimulus extérieur sur ce dernier, comme un muscle ordinaire. En effet un *muscle strié* peut être représenté par ce qu'on pourrait appeler un *câble de relaxation* dont nous espérons pouvoir parler dans une autre communication.

Pour terminer nous donnons quelques autres désordres possibles établis principalement sous forme mathématique et tous vérifiés à l'aide de notre modèle. Il est possible que ces anomalies ont été ou seront trouvées de même dans le cœur humain.

Il s'ensuit des considérations exposées ci-dessus que deux faits différents peuvent être la cause d'un blocage partiel du cœur :

a : l'amplitude du stimulus transmis par le faisceau de His et abordant le ventricule est plus petit que normalement ;

b : la période de relaxation propre du ventricule est allongée.

Ces deux causes peuvent produire exactement les mêmes anoma-

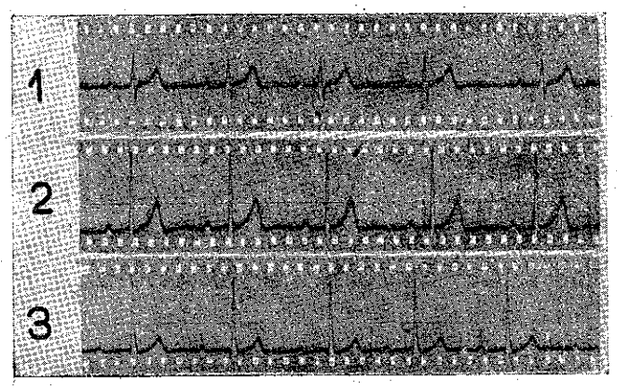

Fig. 16. — Electrodiogramme d'un cœur humain pris dans les trois positions habituelles I, II et III à l'aide d'un amplificateur spécial pour fréquences très basses et un oscillographe de Cambridge.

lies dans le fonctionnement du cœur, on trouvera peut-être des moyens de les distinguer.

Mais de même, une accélération de la période propre du ventricule peut avoir pour résultats quelques anomalies ayant certaine ressemblance à une combinaison de blocage du cœur avec des extrasystoles ventriculaires. Ces anomalies se produisent particulièrement quand la période de relaxation propre du ventricule est légèrement plus longue ou plus courte que la période du sinus, et quand la transmission par le faisceau de *His* est faible. Dans la figure 17 par exemple des systoles auriculaires et ventriculaires sont représentées. Les parties hachurées, suivant les systoles ventriculaires représentent la durée de la période réfractaire telle qu'elle est déterminée entre autres par l'amplitude du stimulus transmis par le faisceau de *His*. Soit :

T_1 = la période du stimulus transmis par le faisceau de *His*.
T_2 = la période de relaxation propre du ventricule.
P = durée de la période réfractaire.

Fig. 17, n°s 1, 2, 3 et 4 représentent différents effets d'extra systoles. Les durées de T_1, T_2 et P sont indiquées à côté des figures en unités arbitraires. Dans cette figure 17 $T_2 > T_1$ c'est-à-dire,

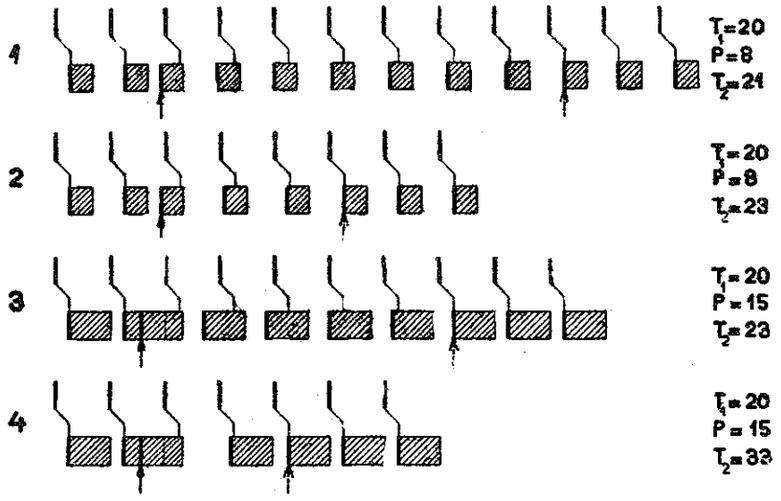

Fig. 17. — Périodes transitoires se développant après une extrasystole ventriculaire produite au moment indiqué par la première flèche. Ce n'est qu'au moment indiqué, pour la seconde flèche (en pointillé) que le battement périodique normal du cœur se reproduit.

Les événements représentés par cette figure ont été calculés et vérifiés expérimentalement à l'aide du modèle et se produisent à la condition que la période de relaxation propre du ventricule T_2 soit plus grande que celle de l'oreillette.

le ventricule battrait, s'il était libre, plus lentement que l'oreillette. Dans ces circonstances une extrasystole ventriculaire peut perturber temporairement (en langage mathématique phénomènes transitoires) le rythme. L'extra systole est indiquée chaque fois par une flèche, tandis que les flèches pointillées indiquent le moment où le cœur recommence à fonctionner normalement.

Les anomalies des figures 17 et 18 ont été établies en se basant sur une transmission strictement unidirectionnelle par le faisceau de His et ces figures montrent clairement que certaines de ces anomalies ressemblent quelque peu aux *contractions rétrogrades*.

On voit dans la figure 17, n° 1, que pour les durées indiquées, le rythme normal ne s'est établi après l'extrasystole qu'au bout de 7 systoles auriculaires.

Pour l'instant auquel se produit l'extrasystole de n° 2 et pour les durées correspondantes de T_1, T_2 et P la période transitoire dure environ le temps de 3 contractions de l'oreillette. De même, dans les n°s 3 et 4, environ 5,5 et 2,5 périodes auriculaires sont respectivement nécessaires pour que le fonctionnement normal soit rétabli.

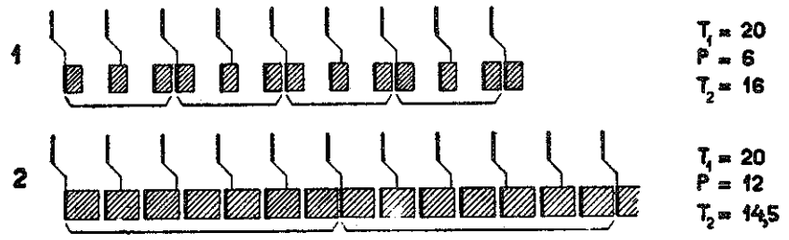

Fig. 18. — Quelques cas possibles (établis théoriquement et vérifiés expérimentalement à l'aide du modèle) si la période de relaxation propre du ventricule T_2 est légèrement plus courte que la période auriculaire T_1. Les parties hachurées indiquent (ainsi que dans la fig 17) la période réfractaire du ventricule : Le N° 1 particulièrement montre le cas où la période fondamentale du rythme n'est pas égale à la période de l'oreillette, mais est deux fois plus longue. Ici, trois systoles ventriculaires se produisent dans le temps de deux systoles auriculaires. La dernière systole ventriculaire dans chaque période fondamentale a quelque peu l'air de produire une contraction « rétrograde » de l'oreillette.

Finalement dans la figure 18, deux anomalies possibles sont représentées. Ici $T_2 < T_1$, c'est-à-dire la période propre du ventricule est plus courte que la période de l'oreillette. De la sorte, il est possible que la période fondamentale du système complet consiste en un nombre entier, de systoles auriculaires c'est-à-dire le phénomène ne se répète exactement qu'après par exemple, 4 ou 5 ou 6 contractions auriculaires. Cette période fondamentale est indiquée par les acollades sous chaque dessin. Nous trouvons donc la possibilité de blocage 2 : 3 ou 5 : 7. Nous ne pouvons pas dire si ces phénomènes se produisent dans le cœur humain.

Du fait que quand

$$T_2 < T_1,$$

une contraction ventriculaire imposée, ne peut se produire que quand le stimulus du faisceau de *His* aborde le ventricule en dehors de sa période réfractaire, il s'ensuit que la période fondamentale T, où

$$T = nT_1,$$

est déterminée par les *inégalités diophantiques* suivantes :

$$P < (nT_1 - mT_2) < T_2,$$

où n et m sont tous deux des nombres entiers et n le nombre le plus petit possible pour satisfaire aux inégalités.

Résumé. — Les §§ 1 et 2 traitent des propriétés principales des oscillations sinusoïdales et de relaxation, tandis qu'au § 3 on expose plus particulièrement les propriétés caractéristiques des oscillations de relaxation :

1. forme non sinusoïdale ;
2. fréquence fixée par un temps de relaxation (constante de temps);
3. grande facilité de synchronisation sous l'influence d'une force électromotrice périodique extérieure;
4. la fréquence peut donc être sujette à des variations importantes, l'amplitude par contre est absolument constante.

Au § 4, on indique un système basé sur la conception que les battements du cœur sont des oscillations de relaxation, ce qui explique les propriétés du rythme cardiaque et ses anomalies (système à 3 degrés de liberté).

Le § 5 donne une description du modèle électrique qui montre, au moyen d'oscillations de relaxation produites par des tubes à néon, les propriétés rythmiques du cœur sain et anormal. L'activité de chaque partie du cœur correspond à l'illumination des tubes à néon.

Le § 6 décrit les expériences exécutées à l'aide de ce modèle et montre des électrocardiagrammes du rythme normal, d'un blocage partiel et complet du cœur et les différents types d'extrasystoles.

Au § 7 on conclut : la période du rythme cardiaque est fixée par un temps de relaxation (ici un temps de diffusion) et l'on expose en outre quelques nouvelles anomalies possibles pouvant être exécutées par le modèle et pouvant être établies théoriquement, mais qui, autant que nous sachions, ne sont pas encore découvertes sur le cœur ou reconnues comme telles.