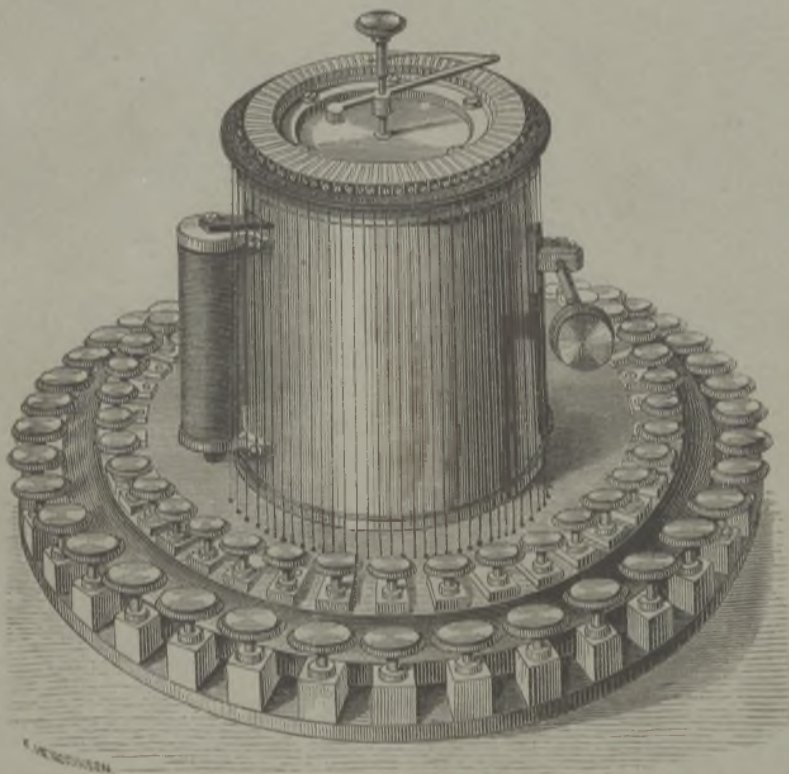


*Repl. 1903.
d. 23/11 2000*

LA ROUE PHONIQUE

PAR

M. PAUL LA COUR.



COPENHAGUE.

K. SCHØNBERG, LIBRAIRE.

KRONPRINSENSGADEN. 2.

PARIS.

R. NILSSON, LIBRAIRE.

RUE DE RIVOLI. 212.

COPENHAGUE.

IMPRIMERIE DE NIELSEN & LYDICHE.

1878.

QC

544

P5

L2X

F1878

Cage

PRÉFACE.

Occupé de recherches sur les courants électriques intermittents, produits au moyen d'un diapason en vibration continue, je fus surpris de voir l'uniformité et l'invariabilité que manifestaient ces courants. Alors l'idée me vint qu'en construisant un appareil qui fît faire à une roue un chemin déterminé par les intermittences d'un courant, on imprimerait à celle-ci un mouvement très égal.

J'imaginai une manière de réaliser cette idée, et je construisis un appareil fort simple : LA ROUE PHONIQUE. La construction en fut terminée au mois de septembre 1875. Mais comme l'appareil, tel qu'il était construit alors, demandait une certaine dextérité pour être mis en mouvement, je ne réussis pas tout de suite à le faire fonctionner. Ce n'est qu'un an après, le 26 octobre 1876, que le même appareil, sans avoir subi le moindre changement, fut mis en marche, grâce à un hasard heureux.

La justesse de la théorie que j'avais imaginée de la roue phonique, s'était donc confirmée. Comprenant que cet appareil pourrait trouver de nombreuses applica-

tions dans la science, la technique et la télégraphie, j'en ai examiné les lois et les propriétés, et ces recherches m'ont conduit à y introduire quelques petits changements qui en ont facilité le fonctionnement, en même temps qu'ils en ont rendu la marche complètement sûre, qualité que ne possédait pas l'appareil sous sa première forme.

En publiant aujourd'hui cette brochure, je ne me bornerai pas cependant à décrire l'appareil ainsi perfectionné, et à donner dans la dernière partie un aperçu des diverses applications auxquelles la roue phonique peut se prêter; mais comme il ne sera pas sans intérêt, je suppose, d'en faire bien comprendre le mode d'action, je donnerai, dans l'introduction, une courte description des courants qui la font fonctionner, et la ferai suivre d'un exposé plus détaillé de ses lois et de ses propriétés.

Copenhague 1878.

P. L. C.

INTRODUCTION.

COURANTS PHONO-ÉLECTRIQUES.

Appareil à diapason. Il y a bien des manières de former *un pont intermittent* pour le courant électrique. Ainsi une roue dentée en rotation et dont les dents viennent toucher successivement un contact isolé, formera un pont intermittent avec celui-ci. De même, on pourra placer un contact en face d'un corps vibrant de manière à faire toucher le contact par le corps vibrant à chaque vibration, et l'on aura un pont intermittent entre le corps et le contact. Nous allons décrire un appareil qui produit, d'une manière uniforme et invariable, un pont intermittent. Au plateau de laiton *AA* (fig. 1) est fixée la pièce de laiton isolée *K*, dans laquelle entre la tige du diapason d'acier *ns*, aimanté de sorte que *n* et *s* en forment les pôles nord et sud. La pièce *K* porte une poupée qui est, par conséquent, en communication avec le diapason. Vers les côtés extérieurs des deux branches du diapason, lesquelles peuvent osciller librement, s'avancent les pôles *S* et *N* de l'électro-aimant *MM*, fixé sur le support *AA*. Celui-ci porte encore le levier à deux

bras uv , mobile autour de l'axe x au moyen de la vis V , le ressort r opposant une résistance à l'autre bras. Celui-ci porte un petit contact en platine un peu conique, étiré et aplati, c , qui peut être amené, au moyen de la vis V , à toucher le côté intérieur de la branche n du diapason, revêtu en ce point de platine. L'une des extrémités, k , de l'hélice de l'électro-aimant est conduite au support AA , l'autre, l ,

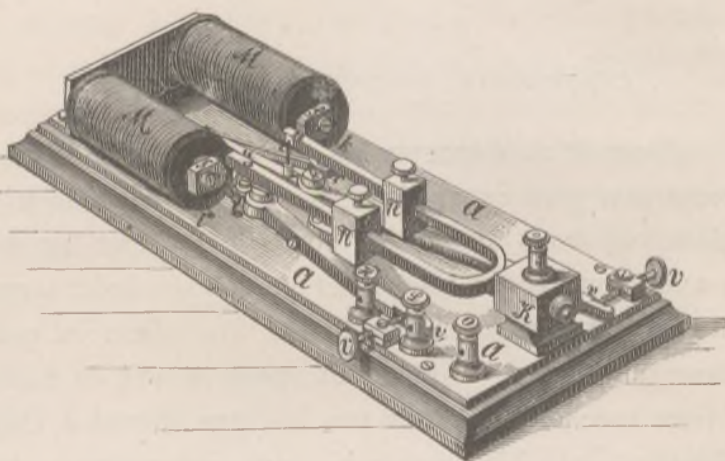


Fig. 1.

traverse le support sous lequel elle se rend à la poupée isolée L . Quand on fait communiquer un pôle d'une pile avec L , et l'autre avec K , l'appareil entre en fonction. Un courant entrant par L parcourra l'hélice de l'électro-aimant, se portera de là, à travers le support, le levier et le contact, sur le diapason et reviendra à la pile en traversant K . MM sera donc aimanté. Il va sans dire que le courant a dû être dirigé de sorte que les pôles SN exercent une attraction sur les branches du diapason ns , les faisant ainsi s'écarter l'une

de l'autre. Alors le contact c et la branche du diapason n cesseront d'être en communication: le courant sera interrompu, le magnétisme se perdra, et les branches du diapason reviendront à leur position primitive. Ceci fera de nouveau rentrer en contact c et n , et ainsi de suite; le courant continuera de s'interrompre et de renaître, grâce à l'action de l'appareil lui-même, tandis que le diapason gardera le son qui lui est propre.

Le support AA (fig. 1) porte un deuxième levier, v_1 , réglé au moyen de la vis V_1 , et au bras court duquel est fixé un contact, c_1 , isolé et placé de manière à pouvoir être amené à toucher le côté intérieur, revêtu de platine, de l'autre branche s du diapason, derrière laquelle il est caché dans la fig. 1. Par un fil conducteur qui traverse le support, le contact c_1 est en communication avec la poupée H . Ainsi, entre les pièces K et H , communiquant, la première avec le diapason, et la seconde avec c_1 , on aura un pont intermittent préférable, dans le plus grand nombre de cas, au pont intermittent cn , puisqu'on ne saurait se servir de ce dernier sans obtenir en même temps une communication avec les autres fils de l'appareil.

Courants phono-électriques. Lorsqu'un pont intermittent est introduit dans un circuit électrique où il n'y a qu'une pile et pas de résistance d'induction, il se forme dans le circuit un courant électrique intermittent qu'on peut représenter graphiquement par les courbes a ou b (fig. 2) en ondes rectangulaires. En introduisant des résistances d'induction dans le circuit ou bien en employant d'autres modes de communication, on peut produire des courants de formes différentes,

tels que d , e et f (fig. 2). Je désignerai, sous le nom commun de *courants phono-électriques* tous les courants dont la force est une fonction périodique du temps. Suivant la distance plus ou moins grande entre le contact c_1 et la branche s du diapason, le temps durant lequel ils se touchent sera une fraction plus ou moins grande de toute la période. Cette fraction, que je désignerai sous le nom de *temps de contact*,

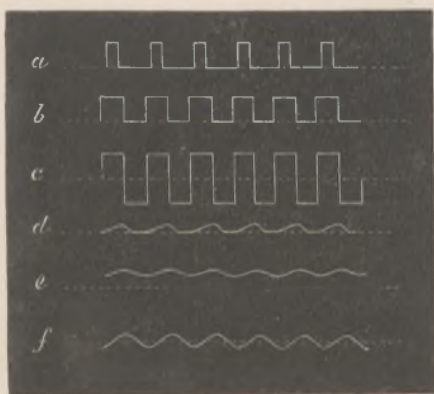


Fig. 2.

peut avoir des valeurs croissant de zéro jusqu'à 1, d'après la position amenée au moyen de V_1 . Si le contact c_1 , ayant une forme convenable, est placé de sorte qu'au repos la branche s le touche, sans toutefois y exercer de pression, le temps de contact sera

à l'ordinaire un peu moins de $\frac{1}{2}$, environ 0,47 ou 0,49. Dans le plus grand nombre de cas un tel courant phono-électrique, dont le temps de contact est de $\frac{1}{2}$ ou à peu près, fera le plus d'effet et servira le mieux. C'est le courant b dans la fig. 2.

En introduisant dans l'appareil (fig. 1) encore un troisième contact qui touche le côté extérieur de la branche s , on établira entre le diapason et ce nouveau contact un pont intermittent qui sera fermé tant que le pont HK sera interrompu, et vice versa. Ainsi en intercalant dans ces deux ponts deux piles qui envoient du contact au diapason, l'une un courant positif, l'autre un courant négatif, on peut faire parcourir le diapason et le fil

conducteur par un courant phono-électrique dont chaque onde est de signe contraire à celui de l'onde précédente (voir fig. 2, *c*).

Si dans un circuit, parcouru par un courant phono-électrique de la forme *b* (fig. 2), on intercale l'hélice d'un électro-aimant, le profil du courant phono-électrique subira un changement, causé par l'induction, et prendra une forme pareille à *d* (fig. 2), puisque le courant sera très faible toutes les fois que le pont se ferme, puis il croîtra, mais pour être interrompu avant d'avoir atteint toute sa force.

Si, au moyen d'un fil conducteur spécial d'une certaine résistance, on met en communication ou les deux extrémités de l'hélice de l'électro-aimant, ou bien le diapason et le contact qui forment le pont intermittent — les Anglais ont donné le nom de *shunt* à ce genre de fil, ce qui paraît devenir la dénomination internationale —, le courant phono-électrique aura la forme *e* (fig. 2).

En intercalant enfin, dans le courant phono-électrique *c* (fig. 2), un électro-aimant avec ou sans shunt, on aura un courant de la forme *f* (fig. 2). Les formes *d*, *e* et *f* dépendent de bien des circonstances: des résistances dans les circuits, de la finesse des spires de l'électro-aimant, de la grandeur et de la forme du noyau de fer, de la durée des ondes etc. Aussi ne sont-elles pas une expression très exacte de la forme des courants phono-électriques; elles n'en donnent qu'une idée approximative.

Intercalation du shunt entre les deux extrémités de l'hélice de l'électro-aimant. Si l'on veut faire agir un courant phono-électrique sur un électro-aimant de manière

à le rendre le plus aimanté possible, et qu'on ne veuille pas employer les variations que subit son magnétisme à chaque onde, on intercale un shunt entre les extrémités des spires de l'électro-aimant; le courant changera de forme et, nous l'avons déjà dit, au lieu de la forme d (fig. 2), il en prendra une analogue à e . La force moyenne du magnétisme change alors dans le rapport des aires renfermées entre d et l'axe des abscisses, d'un côté, et entre e et le même axe, de l'autre. On obtiendra ainsi l'effet le plus grand et le plus énergique, lorsque la résistance du shunt égale à peu près celle de l'hélice de l'électro-aimant. Cet arrangement s'emploie là où un courant phono-électrique doit agir sur un relais ou sur un autre électro-aimant, comme si c'était un courant constant. La somme des éléments du courant représentée par l'aire renfermée entre e et l'axe des abscisses (fig. 2), grandit par l'application du shunt, tandis que le caractère phonique du courant, pour lequel, dans ce cas, on n'a pas d'emploi, s'affaiblit, puisque la différence entre les maxima et les minima des ondes diminue, de sorte que le courant sera plus constant.

Suppression de l'étincelle électrique. Les interruptions fréquentes dans le pont intermittent en gêneraient assez vite les points de contact, si l'on ne pouvait empêcher la formation des étincelles. On y réussit essentiellement en appliquant, comme dans le cas précédent, un shunt entre les spires de l'électro-aimant; on dévie ainsi du pont l'étincelle d'induction qui se fait passage par le shunt, tandis que l'étincelle de la pile reste; celle-ci pourtant ne fait guère de mal, pourvu que la pile ne soit pas très forte.

Si, au contraire, il importe que le courant phono-

électrique de l'électro-aimant garde le plus possible son caractère phonique, on intercale le shunt dans le pont intermittent même, faisant ainsi un conducteur pour l'étincelle d'induction aussi bien que pour l'étincelle de la pile. Dans ce cas encore, le courant de l'électro-aimant aura la forme e (fig. 2); mais on pourra rendre plus grande que dans le cas où l'on intercale le shunt dans l'hélice de l'électro-aimant, la différence entre les maxima et les minima des ondes, en faisant un choix convenable des résistances dans les circuits.

Ordinairement on pourra placer dans le support même de l'appareil le shunt, qui est enroulé, comme les bobines d'un rhéostat ordinaire, de manière à rendre presque insensible sa résistance d'induction.

Ce qui précède, cela va sans dire, ne contient que certaines règles générales pour la production et l'emploi des courants phono-électriques, sans prétendre en donner une analyse complète.

Influence du courant phono-électrique sur un diapason. Si l'on conduit un courant phono-électrique dû à un appareil quelconque à travers les spires de l'électro-aimant de l'appareil AA (fig. 1), c'est-à-dire de la poupée L à la poupée O , fixée directement sur le support AA , et, par conséquent, en communication avec l'une des extrémités de l'hélice, tandis que L est en communication avec l'autre, *le diapason entrera en vibration, pourvu qu'il soit à l'unisson du courant phono-électrique.* Si le son du diapason en diffère un peu, — jusqu'à quatre vibrations par seconde, — il y aura encore des vibrations, mais beaucoup plus faibles; et s'il en diffère beaucoup, il n'y aura plus de vibrations sensibles.

En cas que le courant phono-électrique soit très faible, si, par exemple, il a parcouru un long fil conducteur, on peut donner à l'appareil qu'il doit mettre en fonction d'autres formes que celle de la fig. 1, et qui le rendront plus sensible. On peut prendre un diapason moins grand et, par suite, moins raide. On peut le construire de fer doux et le placer de manière que les deux branches oscillent librement à l'intérieur de deux bobines parcourues par le courant phono-électrique; en ce cas on peut remplacer l'électro-aimant *MM* par un aimant en acier. Ce sont des changements cependant sans conséquence pour ce dont nous parlons ici, et je ne m'arrêterai pas aux autres formes particulières que j'ai données à cet appareil.

Diapason à l'unisson du courant phono-électrique.

Comme nous l'avons déjà dit, un courant phono-électrique, parcourant l'hélice d'un électro-aimant, tiendra en vibration le diapason, quand même le son naturel de ce dernier diffère jusqu'à quatre vibrations par seconde du son du courant phono-électrique. Mais on pourrait demander si, en ce cas, le courant phono-électrique fait faire au diapason exactement une vibration par onde, ou si le diapason donne le son naturel. C'est ce qu'on peut examiner d'une manière assez simple.

On place, dans une chambre *A*, un appareil à diapason en communication avec une pile, de sorte que, rompant et refermant sans cesse le courant, le diapason se maintienne en vibration. Le courant phono-électrique ainsi formé est conduit dans une autre chambre *B*, où il parcourt l'hélice de l'électro-aimant d'un autre appareil pour en mettre en mouvement le diapason, dont

le son naturel est à peu près à l'unisson du courant phono-électrique. On entendra donc dans la chambre *A* le son du diapason *a*, d'où arrive le courant phono-électrique, et, dans la chambre *B*, celui du diapason *b*, mis en vibration par le courant phono-électrique. On prendra ensuite un troisième appareil *c* oscillant au moyen d'une autre pile, et le placera d'abord dans la chambre *A*. On entendra alors les diapasons *a* et *c* qui donnent chacun leur son et, en accordant *c* de sorte qu'il ne diffère pas trop de *a*, on entendra de forts battements, à la production desquels ces appareils sont très propres. Il y aura un battement pour chaque deux vibrations qu'exécute *a* de plus ou de moins que *c*. Les battements sont faciles à compter; supposons qu'on en compte 437 pendant cinq minutes. Puis on transporte l'appareil *c*, sans y rien changer, dans la chambre *B*, pour y compter le nombre de battements formés par le son de *b* et celui de *c*. On verra alors que ce nombre sera exactement de 437 battements pendant cinq minutes, sans varier même si *b* est plus aigu ou plus grave que *a*, et s'il en diffère assez pour n'être influencé que très faiblement par le courant phono-électrique de l'appareil *a*. Si d'abord l'on baisse, et que puis on élève le son naturel de *b* de sorte que, dans le premier cas, il soit de deux vibrations par seconde plus bas, et, dans le second, de deux vibrations par seconde plus haut que le son de *a*, ce qui demanderait une différence de vibrations pendant cinq minutes de $2 \times 2 \times 60 \times 5 = 1200$ vibrations, le nombre des battements formés par *b* et *c*, restera néanmoins de 437 par seconde, de sorte que le nombre des vibrations de *a* et de *b* ne variera

pas. Nous avons donc fait voir qu'un diapason tenu en vibration au moyen d'un courant phono-électrique exécute exactement une vibration par onde, une loi dont on verra plus d'une fois l'importance.

Phase de vibration des diapasons. Au contraire, les branches d'un diapason tenu en vibration par un courant phono-électrique se trouvent dans une phase de vibration plus ou moins avancée, suivant la hauteur du son du diapason. Voici comment on peut constater ce fait.

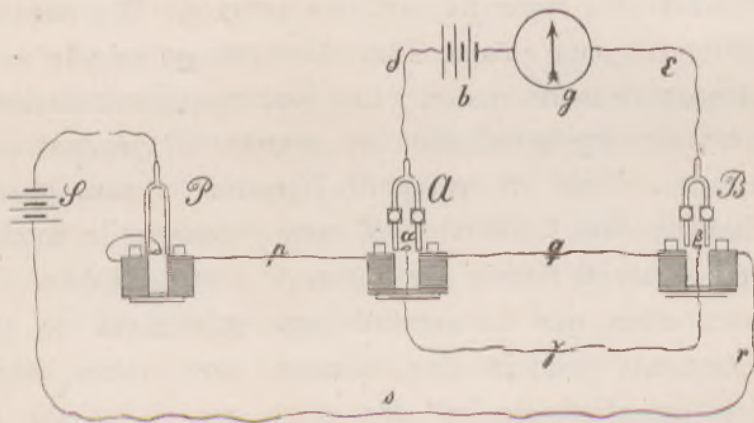


Fig. 3.

P, *A* et *B* (fig. 3) sont trois appareils de la forme fig. 1. *P* est en communication avec une pile *S*, de sorte que son diapason se tient en vibration, produisant un courant phono-électrique qui est conduit par les fils *p q r s* à travers les spires des électro-aimants *A* et *B*, dont il fait vibrer les diapasons. Quand ceux-ci touchent les deux contacts *α* et *β* à la fois, un circuit s'établit à travers les conducteurs *b δ α γ β ε g b*, *b* représentant une pile et *g* un galvanomètre.

Mais le circuit s'ouvrira, si α ou β ou bien tous les deux cessent de toucher le diapason.

Avant de mettre en vibration les diapasons, on ferme α et β , ce qui imprime une déviation au galvanomètre. En interposant un rhéostat en γ , on peut amener une déviation de 100 unités. On déplace ensuite avec précaution α et β , de manière qu'ils parviennent à toucher les diapasons en repos, sans y exercer de pression, et on met enfin en fonction l'appareil P , ce qui fait entrer en vibration les diapasons A et B et établit entre eux et α et β des ponts intermittents. Cela fait, on cherche le temps de contact de ces deux ponts. Quand, à cet effet, on met γ en communication directe avec ϵ de manière à maintenir cette communication, que le pont β soit fermé ou non, on imprimera au galvanomètre une déviation qui donnera le temps de contact de α ; mettons p. ex. que la déviation soit 47, le temps de contact de α sera 0,47. Si, au contraire, on établit une communication directe entre γ et δ de manière à maintenir cette communication, que le pont α soit fermé ou non, la déviation donnera le temps de contact de β ; supposons qu'il soit le même que celui de α , à savoir 0,47. Si l'on réunit enfin les conducteurs, comme le fait voir la fig. 3, on verra que la déviation dépend du son des diapasons. Si les diapasons A et B sont à l'unisson absolu, la déviation sera encore 47, ce qui prouve que les diapasons touchent les contacts au même instant, et se retirent au même instant, c'est-à-dire se trouvent dans la même phase de vibration. Mais si les diapasons diffèrent un peu, la déviation sera moins grande; si cette différence croît — pas assez toutefois pour que les diapasons ne puissent continuer de vibrer, et de donner

chacun un temps de contact de 0,47 — la déviation peut être réduite jusqu'à zéro, ce qui fait voir que l'un des diapasons touche son contact tandis que l'autre est séparé du sien, et vice versa. Donc, l'un des diapasons devancera l'autre presque d'une vibration entière. D'autres expériences, qui ne peuvent s'exécuter qu'au moyen d'appareils décrits plus loin, ont montré, ce que du reste on pouvait prévoir, que c'est le diapason le plus aigu qui devance l'autre, de sorte *qu'un diapason plus aigu que le courant phono-électrique qui agit sur lui peut devancer jusqu'à $\frac{1}{2}$ vibration un diapason à l'unisson du courant phono-électrique, et que ce dernier diapason peut devancer jusqu'à $\frac{1}{2}$ vibration un diapason plus grave que le courant phono-électrique.*

Donc un diapason dont le son naturel diffère un peu du courant phono-électrique continuera de suivre exactement chaque onde du courant, quoique dans une phase de vibration un peu en avance ou en retard.

Variations dans la hauteur du son. Il y a plusieurs circonstances qui peuvent amener des variations dans le nombre des vibrations d'un diapason (fig. 1) et, par suite, dans le nombre des ondes du courant phono-électrique qu'il forme. Voici les raisons capitales qui amènent ces variations dans la hauteur du son :

En rendant les contacts plus raides ou en les approchant du diapason, on augmente le nombre des vibrations; les contacts agissent dans ce cas comme s'ils augmentaient la raideur des branches.

En approchant les pôles (N et S) du diapason, on diminue le nombre des vibrations, parce que les désaimantations seront ralenties, ce qui ralentira aussi les branches toutes les fois qu'elles s'éloignent du pôle.

En renforçant le courant électrique qui met en fonction le diapason, le nombre des vibrations diminuera, parce que les vibrations deviendront plus grandes et les désaimantations plus lentes.

Enfin en augmentant la température du diapason, le nombre des vibrations diminuera.

Toutes ces variations dans la hauteur du son sont petites et ne dépassent guère une vibration par seconde. Cependant en prenant des contacts très raides, on pourrait beaucoup augmenter le nombre des vibrations.

LA ROUE PHONIQUE, SES LOIS ET SES PROPRIÉTÉS.

Principe de la roue phonique. La forme la plus simple de la roue phonique (fig. 4) est celle d'une roue dentée en fer doux, tournant autour de son axe de manière que ses dents passent très près du pôle d'un électro-aimant, sans pourtant le toucher. Si on fait passer un courant phono-électrique à travers les spires de l'électro-aimant, de sorte que le pôle de celui-ci exerce

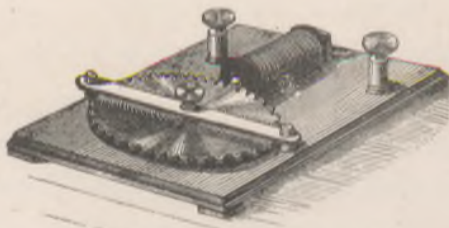


Fig. 4.

des attractions périodiques sur la dent la plus rapprochée, la roue sera en équilibre stable, non seulement lorsqu'elle est en repos, mais encore *lorsqu'elle tourne avec certaines vitesses déterminées*; cela aura lieu surtout lorsque la roue parcourt par période du courant phono-

électrique, un chemin égal à la distance entre deux dents. C'est ce que font voir les considérations suivantes.

Supposons, comme le cas le plus simple, que le magnétisme du pôle soit alternativement nul et d'une certaine valeur constante; supposons encore qu'il suffise de considérer la dent la plus rapprochée du pôle, puisque son attraction l'emporte complètement sur celle des autres dents; supposons enfin que l'attraction, dans chaque moment, soit indépendante de la durée et de la force qu'elle a eues pendant les moments précédents, de sorte qu'elle ne dépende que de la force du courant dans le moment donné et de la position de la dent à l'égard du pôle. Ces suppositions ne sont pas exactes, mais elles simplifient beaucoup la question, sans introduire des erreurs de conséquence pour ce qu'il s'agit d'expliquer.

Dans les fig. 5. 6 et 7, r représente l'axe de la roue phonique, m la ligne médiane du pôle,

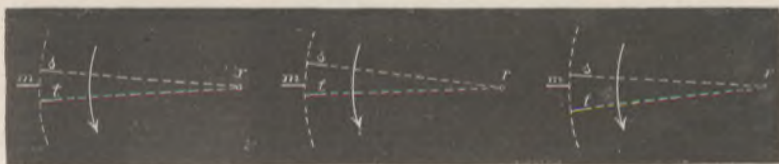


Fig. 5.

Fig. 6.

Fig. 7.

et st le chemin parcouru par la ligne médiane de la dent la plus rapprochée, pendant l'aimantation du pôle.

De s à m , avant que la dent ait atteint le pôle, la roue sera accélérée; et de m à t , lorsque la dent aura passé le pôle, la roue sera retardée.

D'après nos suppositions, et la distance de s à m étant égale à celle de m à t (fig. 5), l'accélération

de s jusqu'à m sera égale à la retardation de m jusqu'à t ($sm = mt$), de sorte que la ligne médiane de la dent passera par t avec la même vitesse qu'elle avait en passant par s . La vitesse de la roue, lorsqu'elle passe devant le pôle, subit bien un peu de variation, puisqu'elle est maximum au moment où la dent est exactement en regard du pôle; mais l'effet total de l'attraction reste sans influence définitive sur la vitesse. Aussi, cette vitesse étant telle que la ligne médiane de la dent suivante arrive en s au moment même où commence une nouvelle attraction — de sorte qu'il en sera de cette dent comme de la précédente — la vitesse de la roue subira, grâce à ces attractions intermittentes, *une variation pendant chaque onde*, à savoir une accélération et puis une retardation (v. plus loin); mais la vitesse moyenne de la roue ne subira pas de variation, et, somme toute, *la roue sera, pendant son mouvement, en équilibre à l'égard des attractions intermittentes.*

La position qu'aura à tout moment cette roue en équilibre mobile est évidemment une fonction du temps. Nous la désignerons comme *la position d'équilibre mobile*. De même qu'on examine la stabilité de l'équilibre d'un corps en repos en lui imprimant une petite déviation et en recherchant si les forces qui l'influencent le ramèneront à la position de repos, de même on examine *la stabilité de l'équilibre mobile* en écartant la roue de cette position d'équilibre — ce qui se fait en retenant ou en avançant un peu la roue — pour voir si les attractions intermittentes l'y ramèneront. Supposons donc d'abord que la roue soit un peu retenue, de manière que la ligne médiane d'une dent parcoure le chemin de s à t , indiqué dans la fig. 6, pendant

l'aimantation du pôle. Il est évident que l'attraction accélérera la dent qui passe plus qu'elle ne la retardera ($m s > m t$), de sorte que la ligne médiane de la dent arrivera en t avec une vitesse plus grande que celle qu'elle avait en passant par s . Ainsi l'attraction accélérera la roue qu'on avait retenue, et contribuera à la ramener à la position d'équilibre mobile. Si, d'autre part, nous admettons que, par une raison ou une autre, la roue reçoive une plus grande vitesse que celle de la position d'équilibre mobile, de manière que la ligne médiane d'une dent fasse le chemin $s t$ (fig. 7) pendant l'aimantation du pôle, il est évident que l'attraction accélère la dent en passage moins qu'elle ne la retarde ($s m < m t$), de sorte que la ligne médiane arrivera en t avec une vitesse moins grande que celle qu'elle avait en passant par s . L'attraction retardera donc la roue, qu'on a avancée, pendant le passage devant le pôle, et contribuera à la ramener à la position d'équilibre mobile. Donc puisqu'une petite déviation de la position d'équilibre mobile, dans quelque sens que ce soit, est compensée et rendue nulle grâce aux attractions intermittentes, l'équilibre mobile est un équilibre stable.

L'expérience confirme la théorie. Si un appareil à diapason, qui se maintient en mouvement au moyen d'une pile, forme, au moyen d'une autre pile, un second courant phono-électrique (v. p. 7) qui parcourt l'électro-aimant d'une roue phonique, cette roue, une fois qu'elle a reçu un mouvement qui fait passer devant le pôle une dent par onde, conservera ce mouvement, que nous appellerons *le mouvement réglé*, et qui est un état de mouvement

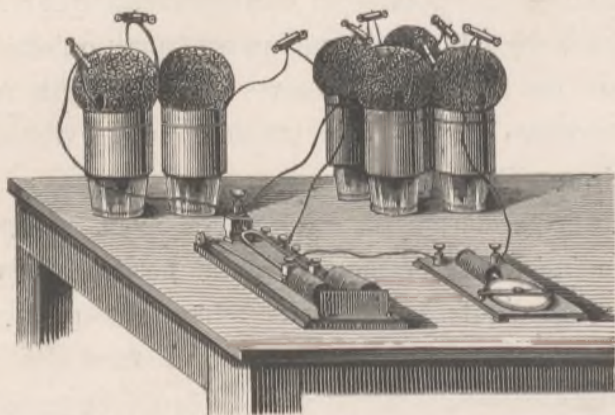


Fig. 8.

analogue et conforme, à beaucoup d'égards, à l'état de mouvement, *le repos*, où se trouve la roue, quand une dent déterminée est attirée dans la direction du pôle.

Influence des forces externes sur la roue phonique.

Force motrice de la roue phonique. Si la roue est dans son mouvement réglé et qu'une force externe vienne l'écarter un peu de la position d'équilibre mobile, le courant phono-électrique tendra à l'y ramener. Mais si cette force reste constante, la roue, tout en gardant la vitesse de rotation, trouvera une autre position d'équilibre mobile dont la phase, un peu retenue ou un peu avancée, dépend de la valeur de la force et de sa direction par rapport au sens de la rotation. Si la force est dirigée en sens inverse de la rotation, la roue sera en équilibre mobile, lorsqu'elle aura été assez retenue pour que la différence entre l'accélération et la retardation ($sm - mt$) de chaque onde, soit égale à la diminution de vitesse que la force causerait dans le mouvement de la roue phonique pendant une période du courant phono-électrique. Cet équilibre mobile sera stable; car une petite déviation de sa position amènera

une variation correspondante dans la différence $s m - m t$, ce qui rétablira l'équilibre mobile. Si, au contraire, la force agit dans le sens de la rotation, la roue sera en équilibre mobile, quand elle aura été assez avancée pour que la différence entre la retardation et l'accélération ($m t - s m$) de chaque onde, soit égale à l'augmentation de vitesse que la force imprimerait à la roue pendant une période du courant phono-électrique. Cet équilibre mobile est stable par la même raison que le précédent.

Déjà le fait que la roue phonique peut se maintenir en mouvement réglé confirme ce raisonnement, car elle a plusieurs résistances à vaincre, telles que le frottement, la résistance de l'air et celle qu'éprouve la roue aimantée en rotation, à cause des courants induits qu'elle fait naître dans les conducteurs métalliques voisins. Ces résistances sont autant de forces qui agissent contre la rotation, et si néanmoins la roue les vainc et se tient en mouvement, c'est que ses dents, en passant le pôle, parcourent, pendant chaque période du courant phono-électrique, un chemin tel que la différence entre l'accélération et la retardation ($s m - m t$) leur fait équilibre. On peut cependant faire agir sur la roue d'autres forces plus grandes, sans en déranger le mouvement. On peut fixer sur l'axe de la roue un fil portant un poids, et faire lever le poids par la roue qui enroule le fil sur l'axe; ou bien on commence par enrouler le fil sur l'axe, puis on imprime le mouvement réglé à la roue, de manière à faire descendre le poids: ni la première force accélératrice ni la seconde retardatrice ne fera varier la vitesse avec laquelle se meut la roue en mouvement réglé. La valeur de la force externe

ne doit cependant pas dépasser une certaine limite; car la force motrice de la roue phonique, force qui doit la compenser, est la différence $sm - mt$ qui peut atteindre tout au plus la valeur de $+st$ ou de $-st$. Si la force externe dépasse cette valeur, l'équilibre mobile est rompu, tout comme cela arrive pour l'équilibre de repos, lorsqu'une force externe, tendant à éloigner la dent attirée vers le pôle, atteint une certaine valeur et entraîne la dent. Si cette force agit dans le sens de la rotation, elle peut être un peu plus grande que dans le cas contraire, ce qui s'explique facilement, les résistances internes de la roue agissant, dans le premier cas, contre la force externe, et la diminuant ainsi, tandis que, dans le second, elles agissent dans la même direction, et en augmentent l'effet.

La valeur de la force mécanique la plus grande mesurée jusqu'à présent est d'un kilogrammètre par minute.

La propriété de pouvoir exécuter un travail, positif ou négatif, sans que sa vitesse subisse la moindre variation, puisqu'elle est seulement déterminée par la longueur de la période du courant phono-électrique et par la largeur des dents, rend la roue phonique propre à plusieurs usages. Nous y reviendrons plus loin.

Autres vitesses de la roue phonique. Hors du mouvement réglé il y a certaines autres vitesses avec lesquelles la roue est en position d'équilibre mobile, et s'y maintient. Ainsi si la roue tourne avec une vitesse moitié aussi grande que celle du mouvement réglé, de sorte qu'il ne passe devant le pôle qu'une dent par deux ondes du courant phono-électrique, le rapport de chaque dent à l'une des deux ondes

sera tout à fait le même que nous avons développé ci-dessus (v. les fig. 5, 6 et 7) pour la roue en mouvement réglé, et cette onde maintiendra la stabilité de l'équilibre mobile. De son côté l'autre onde, qui arrive au moment où le milieu d'un vide passe devant le pôle, amènera un équilibre instable; car, si la roue a été un peu ralentie, cette onde et toutes celles qui y correspondent, retarderont encore plus les dents qui ont passé le pôle les dernières, et si la roue a été avancée, ces ondes accéléreront encore plus les dents qui s'approchent; mais si le pôle et les dents ont une arête aiguë, l'instabilité causée par ces dernières ondes aura une valeur moindre que la stabilité due aux premières ondes qui arrivent au moment où les lignes médianes des dents passent devant le pôle, parce qu'alors les attractions sont plus fortes qu'aux moments de passage des vides. L'effet total de toutes les ondes se manifestera par la stabilité de l'équilibre mobile, stabilité d'une valeur beaucoup moindre toutefois que celle de la stabilité de la roue en mouvement réglé.

Des considérations du même genre peuvent s'appliquer à d'autres vitesses, et c'est ce que l'expérience a confirmé. Ainsi des roues phoniques se sont tenues en rotation avec $\frac{2}{3}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$ de la vitesse du mouvement réglé; mais, nous l'avons déjà observé, la valeur de la stabilité n'est pas aussi grande que dans le mouvement réglé; aussi la roue ne peut-elle accomplir le même travail, sans perdre l'équilibre.

Si l'on imprime à la roue une vitesse double de celle du mouvement réglé, de sorte que deux dents passent le pôle pour chaque onde du courant phono-électrique, la première dent se comportera comme dans le mouvement réglé

(v. les fig. 5, 6, 7), et il en résultera un équilibre mobile et stable. La seconde dent, au contraire, qui passe le pôle dans l'intervalle entre deux ondes, causera de l'instabilité dans l'équilibre mobile; car, si la roue est un peu retenue, elle sera encore plus retardée par l'onde qui arrive après le passage de la dent devant le pôle, et, si elle est un peu avancée, elle sera encore plus accélérée par l'onde qui arrive, lorsque la dent s'approche du pôle. L'instabilité produite par cette dernière dent, égalera ou surpassera la stabilité produite par la première dent, si le temps de contact (v. p. 8) est grand. En ce cas, on ne saurait maintenir la rotation de la roue phonique avec la vitesse en question. Mais l'instabilité sera moindre que la stabilité, si le temps de contact est petit; alors on pourra maintenir la rotation de la roue avec une vitesse double de celle du mouvement réglé. Des considérations pareilles montrent que, le temps de contact étant petit, la roue phonique peut maintenir la stabilité de l'équilibre mobile avec d'autres vitesses plus grandes encore, ce que confirment les expériences; car des roues phoniques se sont tenues en rotation avec une vitesse $\frac{3}{2}$, 2, 3, 4, 5 et 6 fois plus grande que celle du mouvement réglé.

La roue phonique peut donc se tenir en rotation avec des vitesses qui sont les sous-multiples et les multiples les plus voisins de la vitesse du mouvement réglé, ainsi qu'avec des vitesses égales aux $\frac{2}{3}$ et aux $\frac{3}{2}$ de cette dernière, qui sont celles qu'aurait la roue phonique, tenue en mouvement réglé par des courants phono-électriques dont le son serait plus grave et plus aigu d'une quinte. Avec toutes ces vitesses cependant, la stabilité de l'équilibre mobile est moindre que celle du mouvement

réglé, et, pour plusieurs d'entre elles, il faut aiguïser les dents ou diminuer le temps de contact du courant phono-électrique, pour que l'équilibre mobile puisse devenir stable.

Il va sans dire qu'avec toutes ces vitesses la roue phonique tourne également bien dans les deux sens.

Limites de la vitesse de la roue phonique. Lorsque la roue phonique en mouvement réglé se meut librement, sans être influencée par des forces externes, il lui reste toujours ses propres résistances internes à vaincre. Comme en général celles-ci augmentent avec la vitesse, tandis que, d'autre part, la valeur de la force motrice (c-à-d. la plus grande valeur que puisse atteindre *sm*) diminue avec la durée des ondes — puisque les ondes de courte durée trouveront la plus grande résistance d'induction dans l'électro-aimant — il y aura évidemment un maximum de la vitesse que peut obtenir une roue phonique d'une forme et d'une force d'attraction données. Cette limite dépend surtout de la construction de la roue phonique, et elle sera très basse, s'il y a dans le voisinage de la roue aimantée en rotation des conducteurs métalliques où prennent naissance des courants induits, puisqu'il en résulte une résistance qui croît avec la vitesse. Parmi les roues phoniques essayées jusqu'à présent, il y en a qui n'ont pu marcher qu'avec difficulté sous l'influence d'un courant phono-électrique de 100 ondes par seconde, tandis qu'il y en a d'autres qui ont marché sous l'action d'un courant phono-électrique de 600 ondes (c-à-d. 1200 vibrations) par seconde. On n'a pas encore essayé des sons plus aigus; mais tout porte à croire que l'acuité du son d'un courant phono-électrique, pouvant tenir en mouve-

ment une roue phonique bien construite, peut être encore plus grande.

La vitesse angulaire de la roue phonique ne dépend pas seulement de la hauteur du son, mais encore du nombre des dents. Jusqu'à présent des essais ont été faits avec des roues de 18, 20, 24, 30, 36, 60 ou 100 dents. Avec tous ces nombres de dents, la roue phonique a pu se tenir en mouvement réglé sous l'influence d'un courant phono-électrique assez aigu, sans qu'on ait pu décider quel nombre a donné le mouvement le plus sûr; cependant il est plus difficile de mettre en marche les roues qui n'ont qu'un petit nombre de dents et qui ont, par conséquent, une grande vitesse de rotation, par ex. de 20 tours par seconde et davantage.

Quant à *la valeur de la vitesse linéaire*, j'ai montré qu'une roue phonique de 18 dents, où la distance entre les lignes médianes de deux dents voisines était de 21^{mm} , peut tourner avec un courant phono-électrique de 245 ondes par seconde. La vitesse linéaire des dents est donc de $245 \times 21^{\text{mm}} = 5,145$ mètres par seconde ou environ 20 kilomètres par heure*). En considérant la grandeur de cette vitesse et l'égalité du mouvement de la roue phonique, on comprendra que cet appareil peut rendre des services, lorsqu'on a besoin d'une grande vitesse constante.

Il semble aussi que la hauteur du son ait un minimum, car la roue phonique a un mouvement mal assuré sous l'influence de courants phono-électriques très graves, comme de 10 ou de 20 ondes par seconde suivant

*) On pourra du reste appliquer sur l'axe de la même roue phonique un disque ou un cylindre dont le bord aura une vitesse encore plus grande.

la forme de la roue phonique, le moment d'inertie etc. Que ce ne soit pas sans difficulté que la roue phonique se tienne dans un mouvement aussi lent, c'est ce qui dépend sans doute d'une circonstance que nous allons examiner de plus près.

Variation de vitesse de la roue phonique pendant chaque onde. En exposant le principe de la roue phonique, nous avons montré que la vitesse de la roue subit une variation pour chaque onde: une accélération, lorsqu'une dent s'approche du pôle, et une retardation, lorsque la dent s'éloigne du pôle. La roue a donc sa vitesse maximum aux moments où les dents sont exactement en face du pôle; elle a sa vitesse minimum, lorsque ce sont les vides qui passent le pôle. Si le moment d'inertie de la roue est grand, cette variation de vitesse ne sera pas sensible; mais si le moment d'inertie est petit, la variation sera grande, et on pourra, en ce cas, la rendre visible. Si l'on a noirci la roue et qu'on la regarde contre un fond blanc, elle se montrera comme un disque noir dont le bord est formé des dents et des vides qui passent et dont la grande vitesse empêche que l'œil ne puisse les distinguer séparément.

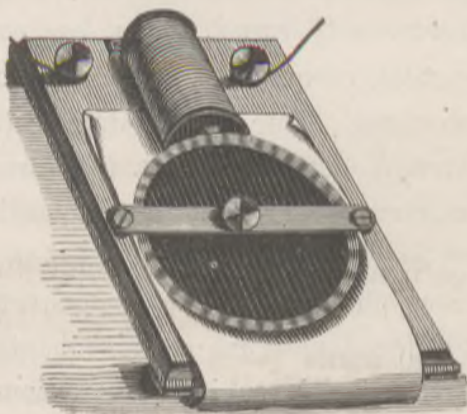


Fig. 9.

Si le moment d'inertie est grand, ce bord se manifeste comme une zone circulaire d'un gris uniforme. Si, au contraire, le moment d'inertie est petit, on aura l'impression, comme le fait voir la fig. 9, d'une *zone circulaire qui semble composée de dents nuageuses et de vides qui ne marchent pas*, de sorte qu'un vide se montre toujours en face du pôle; le nombre de ces dents nuageuses est le même que celui des dents réelles de la roue phonique. L'explication de ce fait doit être cherchée dans les variations de vitesse; la vitesse de la roue est grande au moment qu'une dent passe devant le pôle, et en ce moment la roue ne laisse qu'une impression peu sensible sur la rétine; au contraire la vitesse est moins grande, lorsque c'est un vide qui est en face du pôle, et la roue laisse une plus forte impression de cette position.

Si l'on prend une roue d'un petit moment d'inertie et sur laquelle on voit distinctement des dents nuageuses, et qu'en vissant des poids à la roue même ou à son axe on augmente le moment d'inertie, les dents se montreront moins distinctes; et si l'on augmente assez le moment d'inertie, l'œil finira par ne plus apercevoir des inégalités dans la zone circulaire. Il suit de là que *plus le moment d'inertie est grand, plus les variations de vitesse sont petites*, ce qui est une conséquence naturelle de ce qu'une force d'une valeur donnée (l'attraction), pendant un temps donné, ne fera pas varier la vitesse d'un grand moment d'inertie autant que celle d'un petit moment d'inertie.

Si une roue phonique, tenue en mouvement par un courant phono-électrique d'une certaine hauteur (p. ex. de 100 ondes par seconde), subit des variations de vitesse visibles, la même roue, avec le même moment d'inertie,

présentera, avec un courant phono-électrique plus aigu (p. ex. de 200 ondes par seconde) des variations de vitesse moins visibles ou même invisibles. Donc *un son plus grave donne de plus grandes variations de vitesse qu'un son plus aigu*, ce qui est une conséquence naturelle de ce qu'une force donnée imprime plus de variation à la vitesse d'un corps donné, lorsque cette force agit longtemps que lorsqu'elle agit peu de temps.

On peut du reste mesurer directement les variations de vitesse. Cela se fait par l'application d'un contact isolé que touche successivement chaque dent. Le pont intermittent qui se forme ainsi entre le contact et la roue phonique, est introduit dans un circuit où se trouvent une pile et un galvanomètre donnant une déviation qui se montre constante, grâce à la rapidité de l'intermittence. En déplaçant le contact et en le conduisant le long du bord de la roue phonique, on verra que la déviation augmente et diminue alternativement, et que la distance entre deux positions du contact, donnant deux maxima successifs, est égale à la distance entre les lignes médianes de deux dents voisines. En mesurant la force du courant d'abord dans un maximum, à l'endroit où le contact touche le plus longtemps les dents, et puis dans un minimum, à l'endroit où le contact touche le moins de temps les dents, on aura, en regardant le rapport entre les deux mesures, une idée du rapport entre la plus grande et la plus petite vitesse de la roue phonique. Si le moment d'inertie n'est pas trop petit, la vitesse sera, nous l'avons déjà remarqué, pour ainsi dire sans variation, et le rapport en question égal à 1.

La marche d'une roue phonique qui se meut avec des variations de vitesse sensibles sera ordinairement mal

assurée; elle ne peut pas toujours, comme d'autres roues, se maintenir longtemps en mouvement. Car une petite déviation accidentelle de la position d'équilibre mobile produira une différence entre l'accélération et la retardation, et cette différence pourra bien, dans ce cas, devenir assez forte pour écarter la roue de la position d'équilibre mobile.

On comprendra de même ce que nous avons dit un peu plus haut, que la hauteur du courant phono-électrique qui peut tenir en mouvement une roue phonique, a une limite inférieure au-dessous de laquelle la roue a une marche mal assurée et finit par s'arrêter. Car si le son est grave, une roue phonique, même d'un grand moment d'inertie, subira une variation de vitesse pour chaque onde, et quand il devient trop grave, la marche de la roue sera mal assurée.

Oscillations de vitesse de la roue phonique. Tandis qu'une roue phonique d'un petit moment d'inertie subit des variations de vitesse relativement grandes pour chaque onde, une roue phonique d'un grand moment d'inertie peut être assujettie à une autre espèce de renforcements et d'affaiblissements périodiques de la vitesse. Ces alternations répondent assez exactement aux oscillations qu'exécutera la roue à travers sa position d'équilibre de repos, après qu'on a un peu éloigné de sa position la dent la plus rapprochée du pôle, et qu'on l'a de nouveau abandonnée à elle-même, ce qui amènera une série d'oscillations de la dent devant le pôle. Des oscillations analogues pourront avoir lieu, pendant que la roue est en mouvement réglé; mais comme, dans ce cas, elles passent et repassent une position d'équilibre qui tourne elle-même, elles ne se manifesteront pas

par un mouvement de va-et-vient de la roue, mais par une augmentation et une diminution périodiques de la vitesse du mouvement réglé. C'est pourquoi je les nommerai *oscillations de vitesse*, conformément aux autres oscillations appelées *oscillations de repos*.

Tâchons d'abord de nous expliquer ce qui se passe dans les oscillations de vitesse, puis nous examinerons et confirmerons les résultats obtenus au moyen d'expériences. Supposons, comme le plus simple, que la roue phonique n'ait pas de forces externes ni de résistances internes à vaincre. Supposons encore que *la roue phonique ait exactement la vitesse du mouvement réglé, mais que la ligne médiane d'une dent ne passe pas devant la ligne médiane du pôle dans le moment où l'exige l'équilibre mobile* (c-à-d. dans le moment où l'accélération et la retardation sont égales), *mais, par exemple, un peu plus tard*. On aura donc (voir les fig. 5, 6 et 7) $sm - mt > 0$. Par cette raison la roue sera accélérée, ce qui rendra la vitesse un peu plus grande que celle du mouvement réglé. La dent suivante ne sera pas autant ralentie relativement à l'onde suivante que l'était la dent précédente relativement à l'onde précédente. Cependant si elle est encore un peu ralentie, de sorte que $sm - mt$ reste toujours > 0 , la roue sera encore accélérée, la vitesse augmentera encore etc., jusqu'à l'arrivée *d'une dent qui n'est plus ralentie relativement à son onde*, et nous aurons $sm - mt = 0$. Mais, en ce moment, *la vitesse sera devenue trop grande* (c-à-d. plus grande que ne l'exige le mouvement réglé), et la dent suivante arrivera un peu trop tôt relativement à l'onde qui y correspond. On aura donc $sm - mt < 0$, de sorte que l'attraction retardera la roue et que la vitesse diminuera.

Cette vitesse cependant reste peut-être plus grande que celle du mouvement réglé, de sorte que la dent suivante arrivera encore trop tôt relativement à l'onde suivante. Ainsi la différence négative $sm - mt$ augmentera encore. La retardation grandira, l'accélération diminuera, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'enfin *la vitesse soit réglée. Mais alors la roue sera en avance*; puis, la différence $sm - mt$ étant toujours négative, les attractions continueront à retarder la roue et diminueront la vitesse, jusqu'à ce que de nouveau arrive une dent qui ne soit pas en avance relativement à son onde; alors nous aurons $sm - mt = 0$. *Mais ce point atteint, la vitesse sera trop petite*. La dent suivante viendra trop tard; on aura de nouveau $sm - mt > 0$, et la roue sera accélérée, jusqu'à ce que la vitesse devienne réglée; mais alors les dents passeront le pôle trop tard. Nous en sommes à notre point de départ. La roue aura achevé une oscillation de vitesse double et sera prête à recommencer.

Voici ce que nous remarquons en comparant les oscillations de repos et les oscillations de vitesse.

- 1) Elles consistent les unes et les autres en des mouvements de va-et-vient à travers une position d'équilibre — dans le premier cas à travers une position d'équilibre de repos, dans le second cas à travers une position d'équilibre mobile.
- 2) Aux moments où les oscillations ont leur plus grande étendue dans l'un ou dans l'autre sens, la vitesse est la même que celle de la roue en équilibre sans oscillations — dans le premier cas la vitesse est nulle, dans le second elle est égale à celle du mouvement réglé.
- 3) Au moment où, pendant l'oscillation, la roue pho-

nique passe par la position d'équilibre, sa vitesse s'écarte le plus de celle qu'elle a, étant en équilibre sans oscillations — dans le premier cas, la vitesse aura sa plus grande valeur positive ou négative; dans le second, elle aura sa plus grande ou sa plus petite valeur (celle qui s'écarte le plus de la vitesse du mouvement réglé, laquelle est entre ces deux valeurs).

- 4) Enfin on peut ajouter que l'amplitude des oscillations ne peut, dans aucun cas, dépasser la largeur d'une dent et d'un vide, sans que la roue soit mise hors de sa position d'équilibre.

Nous avons supposé que la roue phonique n'eût pas de forces externes ni de résistances internes à vaincre. Cependant, la présence de ces forces et de ces résistances ne change rien d'essentiel dans le développement que nous venons d'exposer. Il y aura seulement un petit changement dans la position de l'équilibre, de sorte que la ligne médiane des dents ne passera pas celle du pôle au moment que l'accélération et la retardation deviennent égales ($sm - mt = 0$), mais à un moment un peu différent: un peu plus tard, en cas que les forces s'opposent à la rotation, un peu plus tôt, si les forces agissent dans le même sens.

Les quatre points ci-dessus concernent aussi les roues phoniques placées sous l'influence d'autres forces, avec cette seule restriction dans le point 4: que la limite de l'amplitude des oscillations avant la perte de l'équilibre sera encore plus étroite que la moitié d'une largeur de dent. Mais à cet égard aussi l'analogie entre les oscillations de repos et les oscillations de vitesse se maintiendra.

Il est évident que, lorsque la roue phonique est dans

la position d'équilibre — en repos ou en mouvement réglé —, les forces internes et externes s'équilibreront, de sorte que leur somme sera égale à zéro. Si, au contraire, on écarte la roue de sa position d'équilibre, on lui communique une force vive. Aussi la présence d'une telle force se manifeste-t-elle par les oscillations que fait la roue. Au cas que cette force vive ne s'épuisât pas, les oscillations continueraient à l'infini avec la même étendue; on sait cependant que tel n'est pas le cas pour les oscillations de repos, car la force vive s'épuisant peu à peu pour vaincre les résistances internes, les oscillations vont en diminuant, et finissent par cesser tout à fait. Il en est de même, nous allons le voir, pour les oscillations de vitesse. Nous n'avons qu'à rappeler cette loi générale que, toutes les fois qu'un mouvement peut se faire de plusieurs manières, il se fait toujours par la voie la plus simple, et que, si l'on veut qu'il en suive une autre, c'est toujours au prix de quelque perte. Ainsi la vitesse uniforme qu'a la roue en mouvement réglé, est un mouvement plus simple que la vitesse variable. Si donc cette dernière vitesse qu'elle a pendant les oscillations de vitesse, a été produite en déposant dans la roue la petite force vive dont nous venons de parler, cette force s'épuisera petit à petit, et la roue prendra un mouvement plus simple avec une vitesse égale.

Voici des expériences qui constatent ces lois, et nous en font connaître de nouvelles.

Déjà l'ouïe nous offre un moyen pour saisir les oscillations de vitesse. La série d'attractions qui ont lieu entre les dents et le pôle dans une mesure déterminée et rapide, produit un son qui est fort surtout en cas que

l'axe ne soit pas exactement ajusté, mais branle un peu à chaque attraction. Le son aura son intensité maximum, si les dents sont exactement en face du pôle au moment de l'attraction, et son intensité minimum, si les dents sont un peu ralenties ou un peu avancées. C'est ce qui aura lieu, lorsque la roue est en oscillations de vitesse: pendant une courte période les dents seront ralenties à l'égard du pôle, pendant une autre, elles seront exactement en face du pôle, pendant une troisième enfin, elles auront devancé le pôle; puis elles seront de nouveau exactement en face du pôle, et ainsi de suite. Aussi entend-on des renforcements et des affaiblissements périodiques dans l'intensité du son, ce qui nous met à même de compter les oscillations.

Si la roue phonique est en mouvement réglé, de manière qu'aucune oscillation de vitesse ne se fasse entendre, on peut lui faire exécuter des oscillations sensibles à l'oreille, en la touchant légèrement, ou en lui donnant un petit coup. Cependant ces oscillations vont en se perdant, et le son qu'on entend redevient égal, au fur et à mesure que la vitesse redevient égale.

On peut rendre *sensibles à l'œil* les oscillations de vitesse, et ainsi trouver occasion d'examiner de plus près ce qui se passe. On fait traverser successivement ou en même temps les électro-aimants de deux roues phoniques par un seul et même courant phono-électrique. Les deux roues (fig. 10), peintes en noir et mises en mouvement dans le même sens, sont placées l'une au-dessus de l'autre, de sorte qu'elles se projettent sur un fond blanc de manière à faire toucher le cercle formé par l'extrémité des dents de l'une des roues et le cercle formé par la base des dents de

l'autre, et vice versa. La zone circulaire grise, formée des dents et des vides de l'une des roues, coïncidera en partie avec la zone circulaire formée des dents et

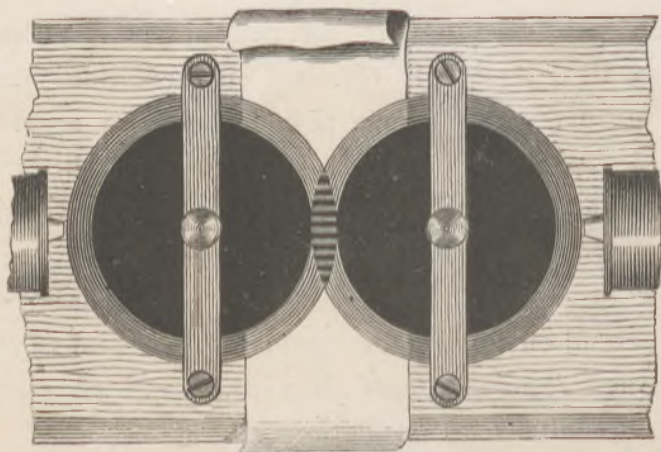


Fig. 10.

des vides de l'autre, et cette partie commune se présentera à la vue comme un champ rayé, ainsi que le montre la fig. 10.

La figure 11, représentant un moment déterminé, sert à mieux faire comprendre ce qui se passe; à cet effet les dents ont été dessinées très grandes. Puis, pour plus de simplicité, les dents et les vides sont faits égaux et comme des secteurs d'une zone circulaire. (C'est une forme qu'on peut très bien donner aux dents d'une roue phonique; une autre forme cependant ne changera rien dans les considérations que nous allons exposer). Au moment donné, les lignes médianes de deux dents des deux roues coïncident dans la ligne *A a B*. Le point *a* est donc couvert par les deux roues et, celles-ci tournant dans le sens indiqué par les flèches, il restera couvert jusqu'à ce que les deux roues

aient tourné de la largeur d'une demi-dent. Alors le point a ne sera plus couvert par aucune d'elles; le fond blanc paraîtra et restera visible, jusqu'à ce qu'un vide entier ait passé, après quoi il sera recouvert au

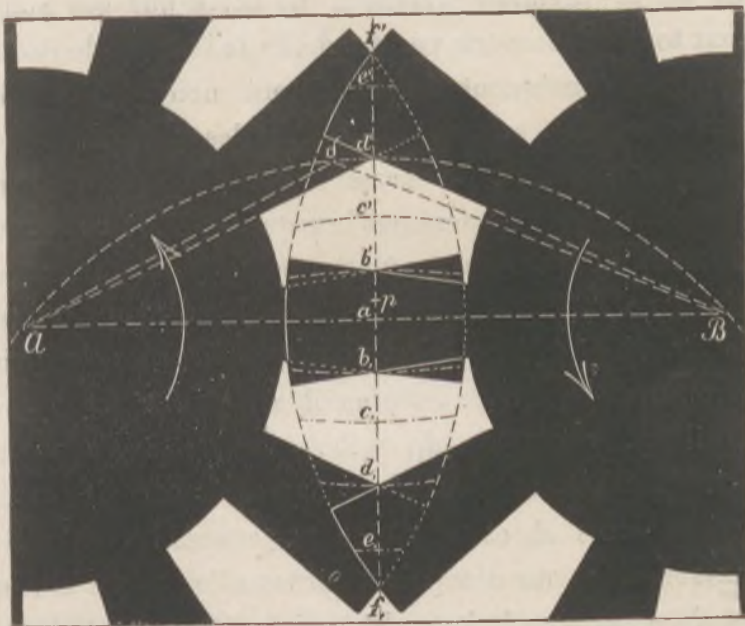


Fig. 11.

même instant par des dents des deux roues. Ce point du fond blanc restera donc alternativement couvert (par les deux roues) et visible (à travers des vides des deux roues) pendant la moitié du temps; il fera sur l'œil l'impression d'être gris. — Au moment donné sur la figure, les lignes médianes de deux vides se coupent dans le point c^1 , et il est facile de reconnaître qu'en ce point le fond blanc sera, de même qu'en a , alternativement visible et couvert pendant la moitié du temps; il fera donc aussi l'impression d'être gris. Évidemment, il en sera de même de tous les points e^1 , c^1 , a , c_1 , e_1 . — Au contraire, les points

d^1, b^1, b_1, d_1 cesseront, dans le moment marqué sur la figure, d'être couverts par l'une des roues, et commenceront au même instant d'être couverts par l'autre; et au moment que la dent de cette dernière a passé, une dent de la première reparaît, de sorte que ces points seront toujours couverts par des dents de l'une ou de l'autre roue; par conséquent ils paraîtront noirs. Donc les points $e_1, c_1 \dots$ se montreront gris, les points $d_1, b_1 \dots$ se montreront noirs; le passage entre les points noirs et les points gris ne sera pas brusque, cela se comprend facilement, mais se fera peu à peu; car un point quelconque de la ligne $f_1 f^1$ est couvert pendant un temps qui est plus grand que $\frac{1}{2}$ et plus petit que 1: plus le point est voisin de $e_1, c_1, \dots$ plus il s'approche de $\frac{1}{2}$, et plus il est voisin de $d_1, b_1, \dots$ plus il s'approche de 1. En faisant passer une circonférence de cercle par les points A et B où se projettent les axes des deux roues, et un des points susnommés, p. ex. d^1 , on aura le lieu géométrique des points (δ) qui satisfont à la condition:

$$\text{angle } \delta A d^1 = \text{angle } \delta B d^1,$$

ces angles étant des angles inscrits dans un cercle et interceptant le même arc. Mais il s'ensuit que le temps qu'emploie le bord d'une dent de la roue A pour passer de $A d^1$ à $A \delta$, est exactement le même qu'emploie le bord d'une dent de la roue B pour passer de $B d^1$ à $B \delta$, et comme dans un moment déterminé, celui qui est marqué dans la figure 11, ces bords se coupent en d^1 , ils se couperont aussi, dans un autre moment, en δ . Par conséquent, l'une des dents commencera de couvrir ce point dans le moment que l'autre cesse de le couvrir, et vice versa, de sorte que le cercle $A d^1 B$

est le lieu géométrique des points noirs. Le même raisonnement s'applique à toute autre circonférence de cercle menée par A et B et un point quelconque (d^1) de la ligne $f^1 f_1$; car tout autre point de cette circonférence est couvert et découvert pendant un temps égal, un peu (angle $d^1 A \delta$) avant ou après le point d^1 . Ainsi le champ formé par la superposition des deux zones circulaires grises et noires, se montrera avec des raies grises et noires immobiles; ces raies sont des arcs de cercle qui, en raison de leur petitesse, se confondent avec les cordes et se présentent comme des lignes parallèles, ce qui est aussi le cas pour d'autres formes de dents.

Avant de passer outre voyons un peu ce qui se passe, en cas que les roues changent de vitesse.

Si les deux roues changent de vitesse au même temps et au même degré, ce qui arrive lorsque, comme nous le verrons plus loin, on change peu à peu la mesure ou le son du courant phono-électrique, les mêmes lignes médianes des dents de la roue A et de la roue B continueront de passer ensemble par les points $e_1, c_1 \dots$ et, l'œil étant hors d'état de reconnaître le nombre plus ou moins grand de dents qui passent, distinguant seulement les endroits gris d'avec les noirs, *l'image restera exactement la même.*

Mais si la vitesse de l'une des roues diffère d'une manière ou d'autre de la vitesse de l'autre roue, on reconnaîtra que, si dans un moment donné les lignes médianes de deux dents se couvrent l'une l'autre en a , les lignes médianes des deux dents suivantes se couvriront à une petite distance de a . Si, par exemple, la vitesse de la roue A est un peu plus grande que celle de la roue B , les lignes médianes se couvriront à une distance toujours

plus grande de a , dans la direction ap . On comprend donc que *les endroits d'où l'œil reçoit les impressions grises et noires avanceront dans le sens où tourne la roue qui marche le plus vite*, de sorte qu'on verra les roues glissant dans ce sens. Si l'on suppose que la vitesse de l'une des roues reste constante, tandis qu'on augmente ou diminue un peu celle de l'autre, la proposition peut s'exprimer de la manière suivante: si la vitesse de la roue qui varie est plus grande que la vitesse constante de l'autre roue, les raies sembleront se mouvoir dans le sens qu'a la première roue en parcourant le champ des raies; si la vitesse de la roue qui varie est moins grande que la vitesse constante de l'autre roue, les raies se mouvront dans le sens contraire à celui qu'a la première roue en parcourant le champ. Bref: *à chaque moment, les raies sembleront se mouvoir dans le sens où la vitesse de la roue qui varie diffère de la vitesse constante de l'autre roue.*

La disposition fig. 10 est très propre à plusieurs recherches sur les oscillations de vitesse. Si les deux roues sont en mouvement réglé et qu'elles ne fassent pas d'oscillations de vitesse, on voit que les raies grises et noires restent immobiles. Si on laisse l'une des roues sans changement, tandis qu'on donne à l'autre une légère impulsion, elle entrera en oscillations de vitesse; on verra alors *osciller le système des raies grises et noires*, lesquelles, nous l'avons déjà observé, sembleront chaque moment se mouvoir dans le sens où la vitesse de la roue phonique qui varie diffère de la vitesse de l'autre roue. Les raies oscillantes, qui ont une certaine ressemblance avec des dents nuageuses en oscillation, rendront ainsi visibles les oscillations de vi-

tesse, de sorte qu'on pourra observer celles-ci comme on le fait à l'ordinaire avec des oscillations de repos.

En observant ainsi les raies formées par deux roues phoniques en mouvement réglé, la vitesse de l'une étant uniforme, tandis que l'autre est mise en oscillations de vitesse, on s'aperçoit tout de suite que *la mesure des oscillations visibles coïncide avec les renforcements et les affaiblissements périodiques qu'on entend dans le son*, lesquels indiquent des oscillations de vitesse (v. p. 37). On voit encore que *les oscillations des raies diminuent peu à peu avec les sons périodiques, et qu'elles finissent par cesser tout à fait comme ceux-ci*.

Si l'on essaie d'augmenter l'amplitude des oscillations, on trouve *qu'on ne peut jamais aller au-delà d'une largeur entière de raie dans l'un ou dans l'autre sens, sans rompre l'équilibre*.

Ces lois, nous en avons déjà parlé plus haut (p. 34). Mais on observe encore d'autres conformités entre les oscillations de vitesse et les oscillations de repos.

Pour les unes comme pour les autres, le temps d'oscillation est un peu plus grand lorsque les oscillations sont grandes que lorsqu'elles sont petites.

Pour les unes comme pour les autres, le temps d'oscillation diminue lorsqu'on renforce les ondes du courant ou qu'on approche le pôle des dents, et en général lorsqu'on renforce l'attraction, et réciproquement.

Pour les unes comme pour les autres, le temps d'oscillation augmente lorsqu'on augmente le moment d'inertie de la roue phonique, et réciproquement.

Excentricité dans la roue phonique. Lorsque la roue est en mouvement réglé sans oscillations de vitesse, on entend ordinairement une autre espèce

de renforcements et d'affaiblissements périodiques du son; et si l'on a fait une marque à la roue, on voit tout de suite que ces périodes sensibles à l'oreille coïncident avec les tours de la roue, et surtout qu'elles *contiennent par tour un renforcement et un affaiblissement du son*. Cela provient de l'excentricité que peut avoir la roue. A cause de l'excentricité, les dents d'un côté de la roue passeront plus près du pôle que celles de l'autre; alors les attractions et, par conséquent aussi les sons, seront plus forts lors du passage des premières que des secondes. Cette variation dans le son pour chaque tour peut être assez forte, au cas que l'excentricité soit assez sensible et qu'en outre le pôle soit près des dents, de sorte que la différence entre les distances des dents du pôle devient relativement grande.

Mais c'est une circonstance qui est sans conséquence pour l'égalité de la marche, ce que nous montre la disposition fig. 10: si les deux roues sont en mouvement réglé sans oscillations de vitesse, on voit que les raies grises et noires restent immobiles, quand même on entend de forts battements provenant de l'excentricité de l'une des roues. *Ces battements donc ne peuvent être accompagnés de variations dans la vitesse*; car en ce cas les raies exécuteraient des oscillations correspondantes.

La roue phonique sous des influences périodiques. Si la roue phonique en repos ou en mouvement réglé reçoit un petit coup, elle entrera en oscillation. Si un second coup vient la frapper dans une telle direction et à un tel moment qu'il augmente l'oscillation que la roue est en train d'exécuter, les oscillations croîtront évidemment; et si plusieurs petits coups qui, appliqués séparé-

ment, ne produiraient que de petites oscillations, viennent successivement frapper la roue d'une manière périodique, de manière à augmenter toujours l'étendue des oscillations, celles-ci pourront devenir assez grandes pour rompre l'équilibre, tandis que des coups de la même force, répartis d'une manière irrégulière ou fortuite, n'auraient pas dérangé l'équilibre.

Mise en mouvement réglé de la roue phonique. On serait peut-être tenté de croire qu'en faisant tourner la roue phonique avec une vitesse trop grande, elle prendra, en se ralentissant, un mouvement réglé; mais il n'en est pas ainsi ou, en tout cas, cela n'arrivera qu'exceptionnellement. Cela se comprend du reste facilement. Tant que la marche de la roue est beaucoup trop rapide, le passage des dents devant le pôle sera irrégulier relativement aux ondes; la répartition des accélérations et des retardations sera fortuite, et celles-ci ne donneront aucun excès considérable dans l'un ni dans l'autre sens. Mais lorsque, la roue se ralentissant, sa vitesse s'approche de celle du mouvement réglé, elle exécutera une oscillation de vitesse à la suite de laquelle sa vitesse deviendra plus petite que celle du mouvement réglé; mais l'amplitude de cette oscillation est trop grande pour que la roue puisse rester en équilibre (v. p. 35).

Cependant si le moment d'inertie est très petit, il arrive quelquefois que la roue phonique peut entrer en mouvement réglé; car les oscillations de vitesse d'une telle roue sont insignifiantes comparées avec les variations de vitesse de chaque onde, et ces variations peuvent contribuer à mettre la roue en mouvement réglé, de même qu'elles l'en font sortir, comme nous l'avons vu plus haut.

Si on veut mettre en mouvement réglé une roue phonique d'un moment d'inertie assez grand, sans recourir à l'accessoire que nous indiquerons plus loin, il faut se servir de l'oreille et, en tournant le bouton fixé à l'axe de la roue, observer le moment où celle-ci s'approche du mouvement réglé. On entend alors une sorte de battements, qui sont dus à la cause suivante. Supposons que le courant phono-électrique contienne 200 ondes par seconde et que, pendant ce temps, la roue phonique s'avance de 196 dents, leur passage devant le pôle correspondra, pendant quatre périodes, à ses aimantations intermittentes et, pendant quatre autres périodes, à ses désaimantations, ce qui produira quatre renforcements et quatre affaiblissements successifs du son, par conséquent quatre battements. Si la roue approche du mouvement réglé, ces battements deviendront plus lents. Il faut alors tourner le bouton avec précaution, jusqu'à ce qu'ils se transforment en un son égal et prolongé qui indique que la roue est en mouvement réglé. — Si l'on dépasse ce mouvement, les battements recommenceront d'abord lents mais puis de plus en plus rapides, à mesure que la vitesse de la roue augmente. Pour le rétablir, il faut diminuer la vitesse, parce qu'il est plus facile de mettre la roue en mouvement réglé en partant d'une vitesse plus faible qu'en partant d'une vitesse plus forte.

Après avoir mis en mouvement la roue, on l'entend le plus souvent exécuter des oscillations de vitesse, car ce n'est qu'exceptionnellement que, dès le commencement, elle aura la vitesse voulue et se trouvera dans la phase convenable.

Capsule à mercure. Après avoir examiné les lois

principales qui président aux mouvements de la roue phonique, nous allons indiquer un simple accessoire qui en facilite beaucoup l'emploi, partie en supprimant les oscillations de vitesse, partie en rendant plus facile la mise en mouvement réglé. Il ne s'agit que d'une capsule ronde et fermée, remplie de mercure et fixée sur la roue phonique ou sur son axe, concentriquement avec celui-ci (v. fig. 12). Elle a la forme d'un cylindre, de préférence en bois, où l'on a creusé une auge annulaire, fermée par un couvercle également en bois, fixé au moyen de colle forte. Dans le couvercle se trouve un petit trou par lequel on introduit le mercure dans le vide annulaire; le trou se ferme au moyen d'une vis de fer. Le milieu de la capsule est percé, pour donner passage à l'axe de la roue, et le frottement suffit à la maintenir en place.

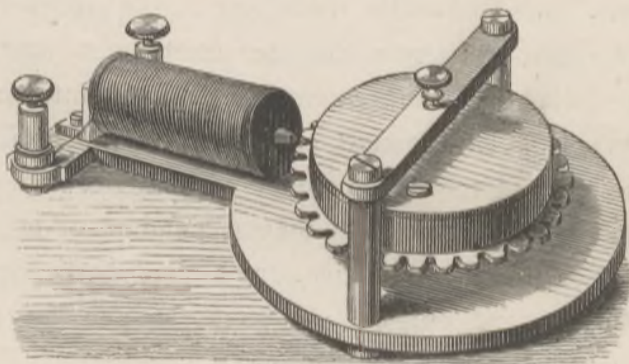


Fig. 12.

L'effet de l'application d'une capsule à mercure à la roue phonique est tout autre qu'une simple augmentation du moment d'inertie de la roue. Représentons-nous d'abord une roue, pourvue d'une capsule à mercure, en repos. En lui donnant un petit coup, on la mettra hors de sa position d'équilibre, un peu plus même

que si le mercure était un corps solide; car la plus grande partie du mercure restera en repos, et ce ne seront que les parties les plus rapprochées des parois de la capsule qui seront entraînées par celles-ci, par l'effet du frottement. Puis, lorsque la roue fait une nouvelle oscillation en sens inverse, elle rencontrera une résistance due au frottement des parois contre le mercure, qui a, en ce moment, un mouvement contraire à celui de la roue, mouvement qui ne regarde pas seulement les parties voisines des parois, mais qui a pénétré plus avant dans la masse. Cette seconde oscillation sera ainsi beaucoup moins grande qu'elle ne l'aurait été sans le mercure. Mais pendant que la roue exécute cette oscillation, les parois de la capsule entraînent de nouveau les molécules voisines du mercure, de sorte que, lorsque la roue exécutera une nouvelle oscillation, elle trouvera de nouveau une résistance due au frottement contre le mercure dont le mouvement se fera maintenant en sens inverse. En somme, pendant chaque oscillation, la roue sera forcée d'imprimer au mercure une force vive qu'elle anéantira elle-même pendant l'oscillation suivante. Ainsi la force vive qui se manifeste dans les oscillations, sera épuisée au bout de peu de temps, et la roue se mettra en équilibre.

C'est ce que confirment aussi les expériences. Tandis qu'une roue phonique qui n'a pas de capsule à mercure, exécute à l'ordinaire beaucoup d'oscillations avant de rentrer en repos, une roue phonique pourvue d'une telle capsule n'exécute que très peu d'oscillations avant d'être complètement en repos.

Il en est de même d'une telle roue phonique en

mouvement réglé; car ayant alors la même vitesse que la roue, le mercure sera en repos relativement à celle-ci. Si alors la roue entre en oscillations de vitesse, elle se comportera à l'égard du mercure qui suit la position d'équilibre mobile, comme la roue en oscillations de repos à l'égard du mercure en repos.

Comme vérification, on peut se servir de la disposition fig. 10 — avec ce seul changement que les roues phoniques portent une capsule à mercure. Lorsque les roues sont en mouvement réglé et présentent l'aspect des raies grises et noires immobiles, on peut, par un petit coup, mettre l'une des roues hors de sa position d'équilibre mobile; on verra alors que les raies ne feront que très peu d'oscillations avant de rentrer dans un repos complet, ce qui prouve que *le mercure modère sensiblement les oscillations de vitesse* comme les oscillations de repos.

Nous avons fait observer plus haut (p. 44) que des forces relativement petites peuvent troubler le mouvement de la roue phonique, si elles agissent d'une manière périodique de sorte que les oscillations de vitesse aillent en croissant. Cependant, comme une capsule à mercure modère rapidement les oscillations, la marche d'une roue, pourvue d'une telle capsule, ne sera pas facilement troublée, quand même les influences sont périodiques.

Si l'on donne à une telle roue phonique une vitesse trop grande (assez grande, ou qui agisse assez longtemps pour communiquer au mercure une vitesse plus grande que ne le demande la roue en mouvement réglé), et qu'ensuite on abandonne la roue à elle-même, elle entre, en se ralentissant, d'elle-même dans le mouvement

réglé, et ce n'est qu'exceptionnellement qu'elle le dépasse. Nous avons dit plus haut (p. 45) que la roue phonique sans capsule à mercure ne peut entrer en mouvement réglé de cette manière, puisque, ayant une vitesse initiale trop forte, elle fera une oscillation d'une amplitude trop grande pour qu'elle puisse reprendre le mouvement réglé après l'avoir dépassé, tandis que, si elle est munie d'une capsule, le mercure modérera cette première oscillation, et lui permettra d'en faire une seconde en sens inverse et de rentrer en équilibre après quelques oscillations.

C'est ce que montre, d'une manière visible, la disposition représentée fig. 10. On met l'une des roues en mouvement réglé. Supposons d'abord que l'autre roue soit sans capsule à mercure, et tournons-la très vite.

Tant que sa vitesse reste beaucoup plus grande que celle du mouvement réglé, on ne voit point de raies; mais lorsque la roue s'approche du mouvement réglé, on voit le système des raies grises et noires glisser dans le même sens que la roue à vitesse variable, d'abord très vite mais puis de plus en plus lentement, jusqu'à ce qu'enfin les raies s'arrêtent tout à fait. Mais cela ne dure qu'un moment; on voit alors les raies qui commencent à glisser en arrière, ce qui indique que la roue à vitesse variable marche plus lentement que la roue à vitesse constante; les raies glissent de plus en plus vite et finissent par devenir invisibles, lorsque la vitesse de la roue est beaucoup au-dessous de celle du mouvement réglé.

Si, au contraire, on remplace cette roue par une roue à capsule, on voit bien les raies glisser de plus en

plus lentement et finir par s'arrêter; mais ensuite elles glissent de nouveau un peu en arrière, puis un peu en avant, et enfin, au bout de quelques oscillations, elles s'arrêtent tout à fait, ce qui montre d'une manière visible que la roue, après avoir atteint la vitesse du mouvement réglé, fait quelques oscillations qui s'éteignent rapidement, et se met alors en équilibre mobile.

Synchronisme de roues phoniques. Il résulte du principe de la roue phonique que les vitesses de deux ou de plusieurs roues phoniques portant le même nombre de dents, sont égales quand elles sont tenues en mouvement réglé par un seul et même courant phono-électrique qui traverse en même temps ou successivement les électro-aimants, puisqu'il est physiquement impossible qu'une des roues s'écarte du mouvement déterminé par le passage, devant le pôle, d'une dent par onde, sans que l'équilibre soit rompu. C'est ce que confirme la disposition fig. 10. Si, en donnant de petits coups à l'une des roues, l'on essaie de déplacer les raies immobiles, on verra qu'on peut bien leur faire faire les petites oscillations dont nous avons parlé plus haut, et qui sont dues aux oscillations de vitesse de la roue, mais qu'il n'y a pas moyen de les déplacer définitivement, sans mettre en même temps la roue hors du mouvement réglé. Il en suit que leur rotation est tellement égale *que les dents qui, dans un moment donné, passent ensemble les pôles, continueront de les passer ensemble*, tant que les roues restent en mouvement réglé.

Si on établit (v. p. 31) sur une roue phonique un contact isolé, de manière à le faire toucher successivement par chaque dent qui passe, le pont intermittent qui se forme ainsi peut servir à la formation d'un

second courant phono-électrique qui aura, cela se comprend, exactement autant d'ondes que celui qui met en mouvement la roue phonique. Si donc, au moyen de ce second courant phono-électrique, on met en mouvement réglé une seconde roue phonique, il y aura de même un synchronisme absolu entre ces deux roues phoniques, ce que confirment aussi les expériences. La seconde roue, de son côté, pourra mettre en mouvement une ou plusieurs autres roues phoniques qui toutes seront absolument synchroniques, et ainsi de suite.

Enfin on peut faire parcourir à un courant phono-électrique, formé au moyen d'une roue phonique, l'électro-aimant d'un appareil à diapason accordé à cette fin; on le tiendra par là en vibration (v. p. 11), de sorte qu'il pourra former un nouveau courant phono-électrique. Le nombre de vibrations du diapason étant exactement le même que le nombre d'ondes du courant phono-électrique qui agit sur lui (v. p. 12), il est évident que le nombre d'ondes du nouveau courant phono-électrique sera aussi le même. Une roue tenue en mouvement réglé par ce courant, sera donc absolument synchronique avec la première.

On peut ainsi établir plusieurs roues phoniques qui ont des rotations absolument synchrones, ou parce qu'elles sont actionnées par un seul et même courant phono-électrique, ou bien parce que l'une d'elles forme un nouveau courant phono-électrique, qui maintient en mouvement la suivante, soit directement soit par l'intermédiaire d'un diapason, et ainsi de suite.

Déplacement de l'électro-aimant d'une roue phonique.

Si on déplace l'électro-aimant d'une roue phonique en mouvement réglé concentriquement à l'axe ou, ce

qui revient au même, si on tourne tout l'appareil et avec lui l'électro-aimant, la roue phonique pourra néanmoins continuer le mouvement réglé, pourvu que le déplacement ne se fasse pas brusquement; car on change par là la position d'équilibre de la roue, mais, comme cet équilibre est stable, la roue ne tardera pas à le reprendre.

Influence sur la roue phonique d'un courant phono-électrique à hauteur variable. Si l'on établit un contact de manière à le faire toucher successivement par les dents d'une roue dentée mise en rotation au moyen d'une machine quelconque, on pourra se servir du pont intermittent qui s'établit ainsi, pour former un courant phono-électrique qui tienne en mouvement réglé une roue phonique, dont il parcourt l'électro-aimant. *Si alors on fait varier la vitesse de la machine et, par suite, la hauteur du courant phono-électrique, la roue phonique, si cette variation n'est pas très brusque, continuera néanmoins le mouvement réglé, en s'avancant exactement d'une dent par onde.* Comme le phénomène précédent, celui-ci s'explique par la stabilité de l'équilibre.

Une roue phonique, tenue en mouvement réglé au moyen d'un courant phono-électrique formé par une autre machine à vitesse variable, tournera nécessairement d'une dent pour chaque onde du courant phono-électrique, par conséquent aussi pour chaque dent de la machine qui tourne en face du contact, de sorte qu'une telle roue phonique imitera exactement les mouvements de la machine (v. plus loin, p. 63).

Formes différentes de la roue phonique. On conçoit facilement que le principe de la roue phonique, développé page 19, n'est pas restreint à la forme de

l'appareil indiquée fig. 4, mais qu'en général il pourra servir dans tous les cas où, conformément aux lois que nous venons d'exposer, les parties mobiles d'un appareil sont en équilibre mobile et stable sous l'influence d'un courant phono-électrique. On peut donner, par exemple, à l'électro-aimant la forme d'un fer à cheval, de sorte qu'une dent de la roue passe devant l'un des pôles, pendant qu'une autre dent passe devant l'autre pôle, ou bien on peut fixer deux roues dentées en fer sur un axe commun, de manière à faire passer les deux roues en même temps devant les deux pôles de l'électro-aimant. On peut également composer la roue d'une autre matière, et prendre un cylindre en laiton muni, parallèlement à l'axe, de barres de fer ou d'acier équidistantes, qui passent près des pôles de l'électro-aimant. Enfin, il y aurait encore bien d'autres manières de construire un appareil fonctionnant d'après le principe développé ci-dessus.

APPLICATIONS DE LA ROUE PHONIQUE.

La roue phonique est un appareil trop nouveau pour être devenue déjà d'un emploi général. Voici cependant quelques applications où elle semble être appelée à rendre de grands services.

La roue phonique comme chronographe. On a construit, sous le nom de chronographes ou de chronoscopes, beaucoup d'appareils pour produire une vitesse constante pendant de petits intervalles. Pour régler le mouvement, on a recours à plusieurs moyens tels que les volants, les pendules coniques etc. Mais tous sont plus ou moins inexacts; même lorsqu'ils sont fabriqués avec le plus grand soin, ils se dérangent facilement, et leur construction est en général très compliquée et très coûteuse. La roue phonique nous présente un appareil simple pour former un chronographe, ou plutôt elle est elle-même un chronographe très simple et pourtant très exact.

Pour juger de l'égalité avec laquelle la roue phonique fait tourner un cylindre, monté sur son axe et couvert de papier, sur lequel les temps à

déterminer sont indiqués au moyen d'une étincelle d'induction ou d'une autre manière, il suffira de prendre en considération quelques circonstances dont nous avons parlé plus haut. La vitesse linéaire de la circonférence de la roue peut dépasser 5000^{mm} par seconde (celle du cylindre pourrait être encore plus grande, mais nous nous bornerons à ce nombre, v. p. 28). D'un autre côté, en adoptant une disposition analogue à celle de la fig. 10, on peut rendre sensibles à l'œil les variations de la roue, puisque le système des raies grises et noires fait connaître toute variation par son mouvement dans l'un ou l'autre sens. Mais si les roues sont pourvues de capsules à mercure, comme il n'y aura pas le plus petit mouvement à voir dans le champ des raies, il faut en conclure qu'il ne se produit aucune variation sensible à l'œil, c'est-à-dire qui atteigne 0^{mm},2. Sur un tel chronographe une seconde sera donc représentée par une longueur de 5000^{mm}, et les points marqués ne pourront avoir une erreur de 0^{mm},2. Exprimée de la manière ordinaire pour les chronographes, l'erreur sera plus petite que $\frac{0,2}{5000} = \frac{1}{25000}$.

En ce qui concerne cette exactitude qui surpasse de beaucoup, à ce que je crois, celle des chronographes les plus délicatement construits, il ne faut pas oublier que, comme c'est le cas aussi pour tous les autres instruments de ce genre, la marche du chronographe en question doit être déterminée au moyen d'observations chronométriques avant et après les mesures auxquelles il sert. Car, de même qu'en général le mouvement des chronographes est influencé par la température, la densité de l'air, le graissage, la poussière etc., de même les circonstances dont j'ai parlé page 16, pourront faire

varier le nombre des vibrations du diapason et partant la vitesse de la roue phonique.

La roue phonique comme horloge. Pour les mesures du temps, le chronomètre se présente comme tellement exact et tellement satisfaisant que nous ne pouvons nous attendre à y voir introduire des améliorations essentielles; de même l'horloge et la montre sont des appareils si peu coûteux et si commodes que, sur ce terrain aussi, on ne peut guère rien attendre de meilleur. Si néanmoins nous mentionnons en quelques mots cette application de la roue phonique, c'est que, fondée sur un principe tout autre que celui de l'horloge ordinaire, elle pourra servir d'horloge dans des circonstances particulières et pour des buts spéciaux.

A cet effet, l'axe de la roue phonique porte une vis sans fin qui met en mouvement une roue dentée, laquelle en fait tourner une seconde, et ainsi de suite. D'après le nombre des dents de ces roues, on fixe sur leurs axes des aiguilles qui marquent les heures, les minutes et les secondes. Tout cela peut se faire sans beaucoup d'exactitude; car la marche de la roue phonique et, par conséquent, celle des autres roues dentées, ne dépend que du nombre des ondes du courant phono-électrique qui met en mouvement réglé la roue phonique. Ce nombre est déterminé par le diapason qui fonctionne comme pendule, tandis que la roue phonique et les roues dentées qu'elle actionne, ne font que compter les vibrations du diapason. C'est donc exclusivement à l'exactitude du diapason qu'il faut porter tous ses soins.

Parmi les circonstances qui peuvent faire varier le nombre de vibrations du diapason (v. p. 16) et, par suite, la vitesse de la roue phonique, les changements de tempéra-

ture ont le plus d'importance. Cette influence, cependant, n'est pas plus grande sur une telle horloge que sur une horloge ordinaire. Voici les particularités qu'offre la roue phonique comme horloge.

1) Les trois parties qui composent ce système : l'appareil à diapason, le moteur (la pile) et le compteur (le système des roues avec les aiguilles), pourront être établies chacune en son lieu n'étant réunies qu'au moyen de fils conducteurs.

2) Plusieurs compteurs (roues phoniques) pourront fonctionner en plusieurs endroits au moyen d'un seul et même courant phono-électrique (v. p. 51); ou bien la première roue phonique pourra commander la deuxième, celle-ci la troisième, et ainsi de suite (v. p. 52), de sorte que toutes les roues auront une marche absolument synchrone.

3) L'aiguille marquant les secondes (ou une autre aiguille plus rapide, si l'on veut) a une marche égale et sans secousses.

Détermination du nombre des vibrations du son.

Jusqu'à présent on s'est servi de plusieurs méthodes et d'appareils différents pour mesurer la hauteur ou le nombre des vibrations du son. On sait cependant qu'ils sont tous fort défectueux et laissent beaucoup à désirer, surtout quant à l'exactitude et à la commodité. C'est encore un problème que résout la roue phonique d'une façon exacte et simple. A cette fin son axe porte, comme plus haut, une vis sans fin qui fait fonctionner un compteur (fig. 13). Pour faciliter l'observation, le compteur peut suivre le système décimal ou centésimal, de sorte que la différence entre deux observations donne directement le nombre

d'ondes qui ont parcouru l'électro-aimant de la roue phonique pendant le temps qui s'est écoulé entre ces observations. Il y a différents modes de procéder

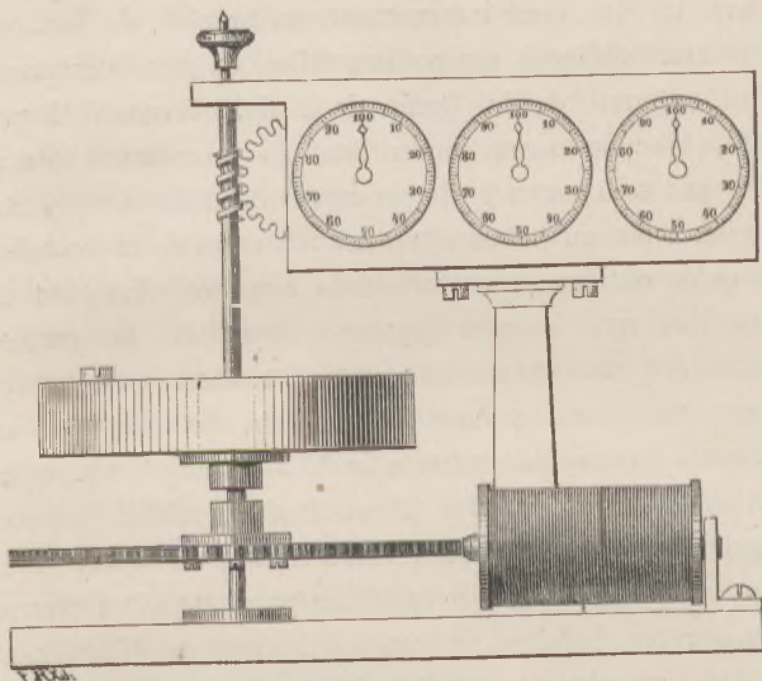


Fig. 13.

d'après les différents corps sonores dont on veut mesurer le nombre de vibrations.

En cas que le corps sonore puisse se maintenir longtemps en vibration et faire naître un pont intermittent entre un contact et lui-même ou des pièces mises en vibration par lui, on peut tout simplement faire passer un courant à travers ce pont intermittent et, grâce au courant phono-électrique ainsi formé, tenir en mouvement la roue phonique avec le compteur. Cela pouvant se faire pendant longtemps, et chaque onde se comptant avec une sûreté absolue, on n'a qu'à observer

le compteur et le chronomètre au commencement et à la fin de l'expérience pour avoir le nombre des vibrations avec toute l'exactitude désirable.

Mais si le corps sonore est hors d'état de produire un tel pont intermittent, on procède de la façon suivante. Grâce à ses poids mobiles, on met le diapason d'un appareil de la forme de la fig. 1 d'accord, à peu près, avec le corps sonore dont on va mesurer le son, en ayant soin toutefois de provoquer des battements lents, par exemple un battement pour toutes les deux secondes, ce qu'on obtient en accordant le diapason plus haut ou plus bas que le corps sonore; supposons le premier cas. Au moyen du diapason, on tient en mouvement une roue phonique, pourvue de compteur et disposée comme le montre la fig. 8. — Il faut compter les battements avec le plus d'exactitude possible. Le son du diapason sera toujours assez fort pour qu'on n'ait pas besoin d'y faire grande attention, et l'on pourra ainsi prêter l'oreille au son qu'il s'agit de déterminer, ce qui, en général, permettra de l'entendre pendant plusieurs secondes (si on peut l'entendre encore plus longtemps, cela vaut toujours mieux). Supposons qu'on l'entende pendant dix secondes. Alors en le faisant résonner à plusieurs reprises et en comptant chaque fois les battements pendant dix secondes, on peut trouver un nombre moyen, disons 5,3, dont l'erreur ne dépasse pas 0,1 de battement. On a ainsi trouvé que le corps sonore fait 1,06 vibrations de plus pendant une seconde que le diapason, nombre qui ne s'écarte pas de 0,02 de vibration de la vérité. — Mais quant au son du diapason même, on n'a qu'à entreprendre une observation du compteur et du chronomètre avant et

après avoir compté ces battements, pour avoir le nombre de ses vibrations avec une exactitude encore plus grande, de sorte que la hauteur d'un son, même très faible, peut se mesurer avec une exactitude d'environ 0,02 de vibration par seconde.

A côté de l'exactitude et de la simplicité de cette méthode il faut encore remarquer que :

- 1) le nombre de vibrations du corps sonore n'est pas troublé pendant l'expérience, puisqu'on ne lui fait exécuter aucun travail mécanique, comme lorsqu'il lui faut tracer les vibrations sur un cylindre couvert de noir de fumée.
- 2) on peut ainsi mesurer la hauteur d'un son, même s'il est faible, ou s'il a une origine telle qu'il échappe à d'autres recherches mécaniques, n'étant sensible qu'à l'oreille.
- 3) l'unité de mesure ne se rapporte pas à des diapasons normaux, antérieurement ajustés, et dont la hauteur varie avec la température etc., mais elle est déterminée directement comme un simple nombre, la roue phonique ayant elle-même, pendant l'expérience, compté le nombre des vibrations du diapason.
- 4) enfin, pendant l'expérience, la hauteur du son reste pour ainsi dire constante, et ne dépend pas, comme c'est le cas pour la sirène, de l'invariabilité d'un courant d'air, ni de l'égalité du frottement, ni, comme pour la roue dentée de Savart, de l'uniformité d'un autre mouvement.

Les facilités qu'offre la roue phonique pour les mesures très délicates du nombre des vibrations, contribueront probablement à éclaircir les lois qui déterminent l'influence, sur la hauteur du son, de la tempéra-

ture, de la pression de l'air (surtout lorsqu'il s'agit des instruments à vent) et, en général, de circonstances dont les changements n'entraînent que de petites variations dans le son et qu'on n'a pu mesurer assez exactement au moyen des méthodes en usage jusqu'à présent.

La roue phonique comme imitateur et compteur d'autres mouvements. Nous avons montré plus haut (p. 53) que la roue phonique peut continuer le mouvement réglé au moyen d'un courant phono-électrique, non-seulement si celui-ci a un son constant, mais encore si le son varie, pourvu que la variation n'ait pas lieu trop brusquement. La rapidité avec laquelle le son peut varier dépend beaucoup du moment d'inertie de la roue phonique. Si le moment d'inertie est grand, la force accélératrice ou retardatrice de la roue phonique, force qui ne peut avoir qu'une certaine valeur déterminée, demande plus de temps pour faire varier la vitesse de la roue; et si le temps nécessaire fait défaut, la roue est mise hors de l'équilibre. Une roue phonique avec un moment d'inertie moins grand, au contraire, se maintiendra en mouvement réglé, même si le son du courant varie assez vite. Ainsi le courant phono-électrique peut s'élever, pendant cinq secondes, de 150 ondes par seconde jusqu'à 300 ou, au contraire, s'abaisser de 300 jusqu'à 150, sans que la roue phonique sorte du mouvement réglé.

Voilà ce qui fait que la roue phonique peut servir à imiter les mouvements d'autres appareils, et à compter ces mouvements au moyen d'un compteur comme celui de la fig. 13. Ainsi si on veut faire imiter à la roue phonique la rotation de l'axe d'une machine, on n'a qu'à fixer sur cet axe une roue dentée, portant le même

nombre de dents que la roue phonique; puis on établira un contact isolé de manière à le faire toucher par les dents de la roue dentée en rotation; enfin on se servira du pont intermittent qui se forme ainsi, pour tenir en mouvement réglé la roue phonique. Les mouvements de la roue dentée seront donc exactement imités par la roue phonique qui les comptera, si on l'a pourvue d'un compteur.

Si l'axe d'une machine ou d'un autre appareil tourne très vite, on peut faire à cet axe une entaille, de manière qu'à chaque tour il touche et quitte alternativement une fois le contact. L'entaille, qui ne sert qu'à rompre le circuit une fois par tour, peut être bouchée avec un corps isolant; la rotation se fera ainsi plus facilement. Si alors l'axe tourne très vite, on aura encore ici un pont intermittent qui peut former un courant phono-électrique; et si ce courant tient en mouvement une roue phonique, celle-ci s'avancera à chaque tour de la largeur d'une dent. Les tours de l'axe seront donc comptés, même si leur nombre s'élève à 600 par seconde (on n'a pas encore des expériences assez sûres pour de plus grandes vitesses), et que la vitesse de l'axe subisse des variations relativement grandes.

De même que les autres systèmes de compteurs électriques, une roue phonique qui sert ainsi d'imitateur ou de compteur, se tient en action seulement au moyen d'une communication électrique. Mais elle présente vis-à-vis de ces systèmes les particularités suivantes:

- 1) Elle tourne d'une manière égale, et non pas par secousses; elle offre ainsi — à distance, si l'on veut — une image fidèle des mouvements de la machine.
- 2) Elle ne peut pas mécompter, puisqu'il est phy-

siquement impossible qu'une seule dent de la roue phonique fasse défaut, sans que la roue s'arrête tout à fait. Les autres systèmes de compteurs, au contraire, pourront mécompter et donneront ainsi des indications fausses.

- 3) Elle peut compter beaucoup plus rapidement que les compteurs qui fonctionnent le plus vite.

Emploi de la roue phonique dans la télégraphie.

Il y a, on le sait, toute une littérature qui traite des inventions de systèmes télégraphiques imprimeurs ou à transmissions multiples, et autres. Mais de tous les systèmes proposés jusqu'à présent, peu seulement servent dans la pratique; et la raison c'est qu'ils supposent

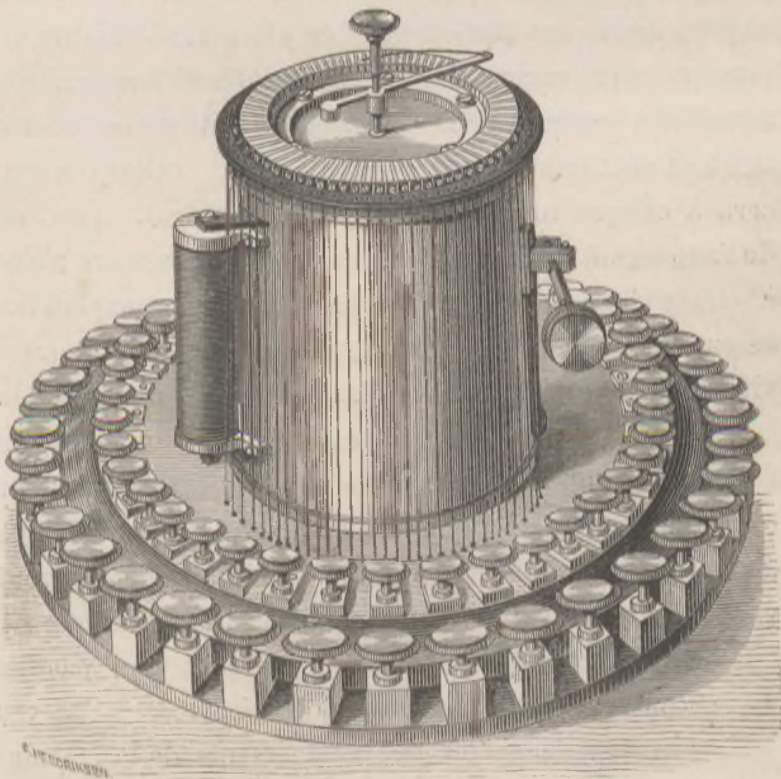


Fig. 14.

en général que les stations en communication télégraphique sont munies d'appareils absolument synchroniques. Mais tous ceux qu'on a proposés jusqu'ici sont coûteux, difficiles à maintenir en ordre et le plus souvent peu exacts. Le grand nombre de ces tentatives prouve cependant qu'il reste encore beaucoup à faire sous ce rapport pour la télégraphie, et fait voir en même temps que les problèmes dont il s'agit, seront faciles à résoudre, si on réussit à en établir la base indispensable: le synchronisme. Cette base, la roue phonique nous l'offre, comme l'expérience le fait voir.

Roue phonique pourvue d'un contact glisseur et de plaques métalliques. Un support de laiton (fig. 14) porte en haut un anneau en ivoire, dans la surface duquel ont été introduites soixante plaques métalliques égales et équidistantes qui sont ainsi isolées entre

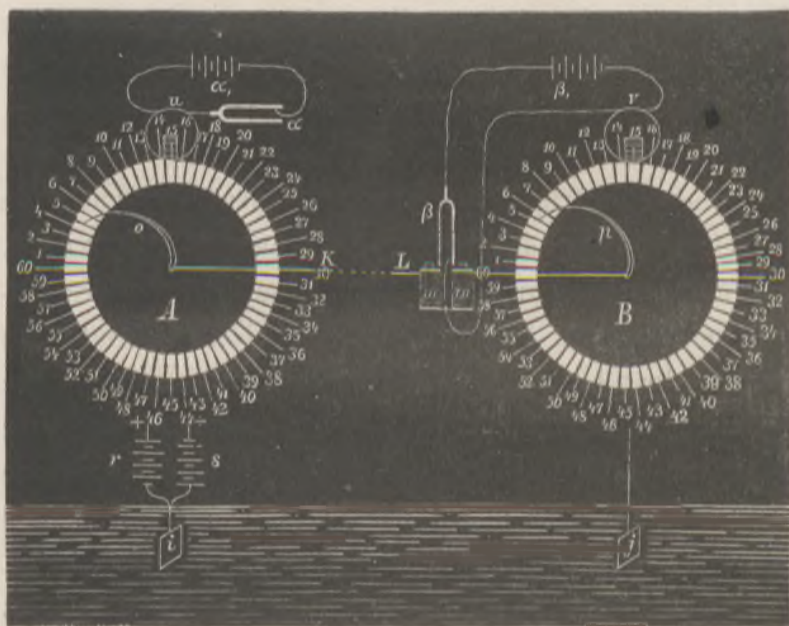


Fig. 15.

elles. Au moyen de fils conducteurs, les plaques métalliques sont en communication avec soixante poupées isolées et fixées à la base de l'appareil, où elles sont disposées en deux étages, de sorte que les plaques communiquent alternativement avec une poupée de l'étage supérieur et une poupée de l'étage inférieur. Les plaques ont une surface lisse sur laquelle se meut un contact glisseur, monté sur l'axe d'une roue phonique de trente dents, qui est placée en dedans du support de laiton, concentriquement avec celui-ci. A gauche, on voit l'électro-aimant dont les pôles traversent le support où ils tiennent en mouvement réglé la roue phonique, lorsqu'un courant phono-électrique parcourt l'électro-aimant.

La fig. 15 représente deux stations où sont en mouvement synchrone deux roues phoniques *A* et *B* de la construction décrite ci-dessus. La station de départ est en *A*, la station d'arrivée en *B*. A la première, le diapason α est tenu en vibration continue de la façon ordinaire (v. p. 6); pour plus de simplicité, la pile qui tient en vibration ce diapason a été supprimée dans la figure. A travers le diapason α et la pile α_1 se forme un courant phono-électrique qui parcourt l'électro-aimant *u* de la roue phonique *A*, la tenant ainsi en mouvement réglé. Son contact glisseur *o* parcourra donc l'anneau des plaques métalliques, en touchant successivement toutes les plaques dont les fils, sur la figure, sont marqués avec les nombres 1, 2, 3, . . . 60. — *r* et *s* sont deux piles; le pôle négatif de l'une et le pôle positif de l'autre communiquent avec le sol par le plateau *i*. Commençons par mettre l'autre pôle de la pile *s*, le pôle négatif, en communication avec les plaques impaires, et puis le support, donc aussi le contact glisseur *o*, en

communication avec le fil télégraphique K . Alors, le contact tournant sur les plaques, des ondes négatives parcourront le fil télégraphique.

A la station d'arrivée, le fil télégraphique L , traversant l'hélice de l'électro-aimant mm , est conduit au support de la roue phonique B , et, par suite, au contact glisseur p . De p le courant passe dans la plaque que p vient à toucher, et de là enfin il entre dans le sol par le plateau j , comme nous le verrons plus loin. En traversant l'électro-aimant mm , le courant phono-électrique, qui arrive de A , tient en vibration continue le diapason β , qui fait exactement le même nombre de vibrations que le diapason α , placé à la station de départ. Ainsi se forme, à travers le diapason β et la pile β_1 , un courant phono-électrique qui, en parcourant l'électro-aimant v , tient en mouvement réglé la roue phonique B .

Les mouvements des roues phoniques A et B sont donc absolument synchrones (v. p. 52). Mais on peut encore faire sortir les ondes négatives, qui entrent par les plaques impaires de la roue phonique A , par les plaques impaires de la roue phonique B . A cet effet, avant que le conducteur entre dans le sol j , on met ces dernières en communication avec un galvanoscope, dont l'aiguille sera déviée quand il est parcouru par les ondes négatives. On tourne l'anneau entier des plaques métalliques, ou bien, comme on l'a fait avec la roue phonique dans la fig. 14, on déplace, au moyen de la vis qui se trouve à droite, l'électro-aimant v , concentriquement avec l'axe, jusqu'à ce que la déviation du galvanoscope atteigne son maximum; alors chaque onde négative sortira en entier ou en majeure partie

par les plaques impaires. S'il en est ainsi, il est évident que *tout courant qui entre dans le contact glisseur o par des plaques impaires, sort par le contact glisseur p à travers des plaques impaires.*

En conduisant, à la station de départ, le pôle positif de la pile r à une des plaques paires, une onde positive parcourra le fil télégraphique au moment où le contact glisseur passe la plaque, et cette onde entrera, à la station d'arrivée, dans une plaque paire d'où elle se rendra dans le sol j . Tant qu'à la station de départ la pile r est en communication avec cette plaque paire, une onde positive partira à chaque tour du contact o , et sortira par le contact p en traversant une seule et même plaque de l'appareil. Cette plaque cependant portera probablement un autre numéro que celle par laquelle l'onde sort de A ; car c'eût été un grand hasard si, en mettant la roue phonique B en mouvement réglé, on avait mis son contact glisseur sur la plaque correspondant à celle où se trouvait au même moment le contact de A . Pour y remédier, la station d'arrivée est pourvue d'un commutateur formé de 30 conducteurs qui sont en communication, d'un côté, avec les trente plaques paires de la roue phonique B , et de l'autre, à travers les appareils télégraphiques proprement dits, les relais p. ex., avec le sol j . Grâce à ce commutateur on peut faire parcourir à l'onde positive le relai de la station d'arrivée qui correspond à la plaque de la station de départ. *L'effet du commutateur sera donc le même que s'il pouvait mettre le contact glisseur p sur la plaque qui correspond à celle où se trouve le contact glisseur o.*

Si le pôle positif de la pile r communique en même

temps avec plusieurs plaques paires de *A*, une onde partira de chacune d'elles, au moment que le contact glisseur les touche: ces ondes sortiront donc par des plaques paires de *B*, et parcourront les relais correspondants. Par conséquent, en envoyant une onde déterminée par une certaine plaque de la station de départ, on fera fonctionner un relais correspondant de la station d'arrivée, et on ne fera fonctionner que ce seul relais, que des ondes parcourent les autres plaques ou non. *On pourra donc, d'un nombre quelconque des trente conducteurs de la station de départ, envoyer des signaux qui seront reproduits par le même nombre d'appareils de la station d'arrivée, et chacun d'eux pourra expédier autant de signaux par seconde que la roue fait de tours pendant le même temps.*

On conçoit facilement que cet arrangement pourra servir de base à plusieurs genres de télégraphie, surtout à la pantélégraphie et aux systèmes télégraphiques imprimeurs et à transmissions multiples; mais il nous mènerait trop loin d'entrer ici dans de plus longs détails.

Applications de la roue phonique à des recherches scientifiques. Nous finirons en citant quelques autres cas où la roue phonique peut servir dans des recherches et des expériences scientifiques.

Si l'on veut examiner un phénomène qui se manifeste à un moment déterminé de la période de l'onde, comme, par exemple, la force du courant phono-électrique lui-même ou d'un autre courant électrique qui a des périodes communes avec lui, on peut se servir de la roue phonique. A cet effet, on applique un contact isolé de manière que les dents de la roue phonique le

touchent au moment voulu de la période de l'onde. Le pont intermittent qui se forme ainsi, livrera passage au courant dont on cherche la force au même moment, de sorte que le courant, à l'instant considéré, peut être séparé de celui du reste de la période et être mesuré à part.

C'est cette méthode dont je me suis servi, pour examiner la phase de vibration des diapasons (v. p. 16).

Grâce à son mouvement égal, la roue phonique pourra servir à mesurer ou à tracer graphiquement la vitesse de rotation que présente, *à chaque moment*, un appareil ou une machine. Il y a plusieurs manières de procéder; en voici une qui est très simple. L'axe d'une roue phonique, tenue en mouvement réglé au moyen d'un appareil à diapason, porte un mince disque noir, percé de trous égaux et équidistants qu'on a disposés de manière à en former plusieurs cercles concentriques, dix par exemple, dont celui qui est le plus près du centre contient cinq trous, le suivant dix trous, et ainsi de suite jusqu'au dixième cercle qui en aura cinquante. En regardant un fond blanc à travers ce disque tournant, les cercles paraissent comme des zones circulaires grises et concentriques (v. fig. 16). — De son côté, la machine dont on va mesurer la vitesse, fait tourner un cylindre peint avec des raies égales noires et blanches, parallèles à l'axe. Ce cylindre qui paraît gris, se trouve au-dessous du disque susnommé. Si la machine a une vitesse à faire avancer le cylindre de trente-cinq raies, par exemple, à chaque tour de la roue phonique, la septième zone du disque présentera l'aspect de raies grises et noires immobiles, ainsi que le fait voir la fig. 16 (comp. p. 38). Si la vitesse du cylindre augmente un peu, ou verra

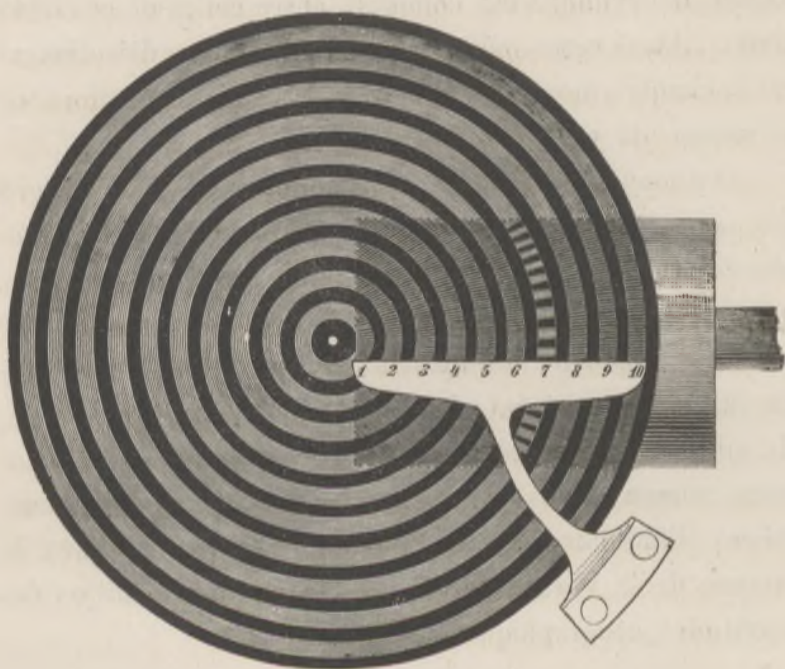


Fig. 16.

glisser les raies dans le sens où tourne le cylindre. La vitesse croît-elle toujours, les raies glisseront plus rapidement, et l'on verra dans la huitième zone d'autres raies pareilles, qui, commençant par se porter rapidement en sens inverse, puis se ralentissant peu à peu, au fur et à mesure que les raies de la septième zone vont de plus en plus vite, finissent par s'arrêter tout à fait; la machine aura alors une vitesse à faire avancer le cylindre de quarante raies noires à chaque tour de la roue phonique. L'application de l'appareil est très facile: on aperçoit tout de suite la zone qui présente des raies immobiles, et la vitesse du cylindre est proportionnelle au numéro correspondant qu'on lit sur l'échelle fixe dont l'appareil est muni. Si deux des zones présentent des raies se mouvant en sens inverse les unes des autres, la

vitesse du cylindre est comprise entre celles de ces deux zones. Ainsi cette méthode permet de juger directement et à chaque moment de la valeur et des variations de la vitesse du cylindre.

Au moyen de la disposition adoptée fig. 15, on aura deux mouvements absolument synchrones dans deux stations réunies par un fil télégraphique. Ces mouvements, qui ont une vitesse telle qu'une seconde est représentée par une longueur de plusieurs mètres, et dont le synchronisme ne présente au maximum qu'un écart de $\frac{1}{5}$ de millimètre, pourront recevoir de nombreuses applications, comme dans les recherches relatives aux phénomènes d'induction et aux charges électriques, dans la mesure de la vitesse de l'électricité, la détermination des longitudes géographiques etc.

