

Sur les phénomènes acoustiques des condensateurs

(A propos du récent mémoire de M. H. Perkins)¹

Par A. RIGHI

[Laboratoire de Physique de l'Université de Bologne.]

1. J'ai eu l'idée qu'on pourrait obtenir des phénomènes sonores analogues à celui de l'arc chantant de Duddell en substituant à l'arc un tube à décharge ou une flamme. La prévision fut confirmée dès les premiers essais; mais on reconnut bientôt que les phénomènes présentaient des caractères particuliers, qui ont été étudiés longuement.

Le Mémoire résumé ici est l'exposé des résultats obtenus.

La source de courant est une batterie de 500 à 500 petits accumulateurs, et la disposition générale des expériences est celle de la figure 1.

Dans cette figure B est la batterie, R une résistance liquide, L_1, L_2, L_3 des bobines de self-induction, G le

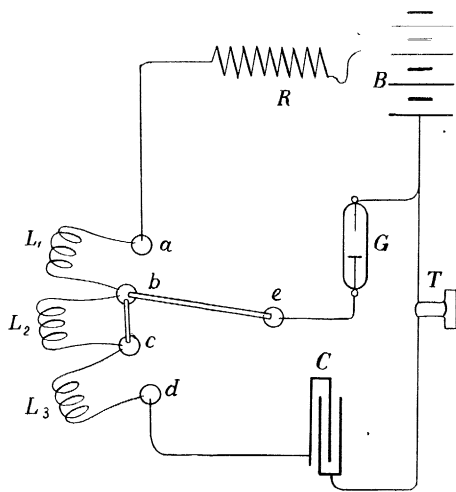


Fig. 1.

tube à décharges (ou la flamme), C le condensateur, T un téléphone (rarement employé). La portion de circuit BRL₁GB correspond au circuit principal de Duddell, GL₂L₃GTG au circuit dérivé.

On voit en *abcde* des petits godets à mercure, et en *bc*, *be* des ponts de gros fil métallique, au moyen desquels, et d'autres semblables, on peut commodément introduire ou non à volonté les bobines L_1, L_2, L_3 dans les circuits.

Comme les phénomènes sonores que l'on obtient

1. La publication récente d'un travail de M. H. Perkins *Le Radium*, 6, 1909, 294-298 sur un sujet analogue donne un intérêt particulier au mémoire de M. A. Righi. Le travail primitif a été présenté le 25 Mai 1902 à l'Académie Royale des Sciences d'Amsterdam. M. A. Righi en a tiré le présent extrait. N. D. I. R.

avec un tube à vide sont beaucoup plus clairs et frappants que ceux que donne une flamme (bec Bunsen avec introduction de sel dans la flamme près des deux fils de platine fonctionnant comme électrodes), on ne parlera ici que des premiers.

Si l'on a le soin de fermer le circuit principal après avoir fermé le circuit dérivé, on entend un son musical qui semble continuer indéfiniment, provenant du tube G, du condensateur C et du téléphone T, si celui-ci est dans le circuit dérivé; et cela presque avec tout tube de décharge.

Mais certains tubes donnent des sons très purs et très forts. Les meilleurs résultats s'obtiennent avec des tubes ayant comme cathode un disque plan de métal et comme anode un fil fin métallique normal à la cathode. Comme celle-ci se ternit par un long usage, et le timbre des sons devient mauvais, il y a avantage à la former avec du mercure bien net.

Le tube représenté à un tiers environ de sa grandeur par la figure 2 donne des résultats excellents et très constants; B est l'anode en platine, A la cathode en mercure. La distance entre les deux est environ de 1 millimètre; mais on peut la faire varier, soit en inclinant le tube, soit en faisant passer du mercure de A dans le réservoir C ou en sens contraire. Ce tube contient de l'hydrogène à environ 8 millimètres de pression.

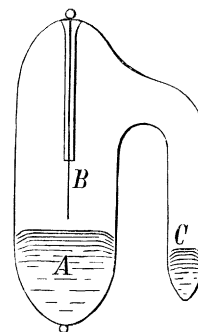


Fig. 2.

La résistance non inductive R peut être constituée par des colonnes minces d'une solution saturée de sulfate de cuivre, et par un artifice facile à imaginer on peut la faire varier avec continuité (ce qui est nécessaire pour certaines expériences).

C a été quelquefois un condensateur en mica d'une capacité variable de 0,05 à 1 microfarad; d'autres fois c'était un condensateur à air formé par deux gros disques métalliques, dont on pouvait régler (au moyen de vis) la distance d'une manière continue.

On trouve particulièrement bonne la disposition suivante. Un des plateaux est horizontal et est recouvert par une feuille de papier à écrire; l'autre plateau est placé au-dessus et s'appuie sur le papier par

un point de son contour, pendant qu'au point du contour diamétralement opposé, il reste plus ou moins éloigné du papier. Des vis servent à régler sa légère inclinaison.

La hauteur des sons obtenus varie avec les constantes des deux circuits. Lorsqu'il n'y a pas d'inductance sensible (ponts métalliques placés en *ab*, *bc*, *cd*, fig. 1), elle ne correspond nullement avec celle des sons produits par l'arc de Duddell. On est donc en présence de phénomènes d'autre nature, qui seront étudiés ici les premiers. Les effets dus à l'introduction des bobines seront décrits ensuite.

2. Même sans employer le téléphone, l'intensité des sons, qui généralement ont un timbre parfaitement musical, est telle, qu'on les entend même d'une pièce voisine à celle où se trouvent les appareils.

La hauteur du son croît d'une manière continue lorsqu'on fait croître la force électromotrice de la batterie d'accumulateurs, ou lorsqu'on diminue soit la résistance du circuit principal, soit la capacité du condensateur placé dans le circuit dérivé. Cela pour un tube à décharges donné; car le son, par exemple, monte en hauteur lorsque, la pression dans le tube étant 10 millimètres, on diminue de quelques millimètres cette pression, ou bien lorsqu'on rapproche les électrodes entre elles.

Par des variations brusques de la résistance ou de la capacité C on obtient naturellement des sons successifs de hauteurs différentes; et si, par exemple, on fait changer la résistance R au moyen de touches comme celles d'un piano, on constitue une espèce d'instrument musical qui se prête à l'exécution de mélodies.

Une étude attentive de ces phénomènes a conduit à les expliquer de la manière suivante.

Au moment où l'on ferme le circuit principal (BRGB, fig. 1) il s'établit un courant, qui tout d'abord charge le condensateur comme si *bcGB* n'existait pas; mais avant que ce courant de charge soit réduit à zéro la différence de potentiel entre les électrodes du tube arrive à la valeur nécessaire pour que la décharge ait lieu dans le gaz raréfié. A cause de la présence de la grande résistance R la différence de potentiel entre les électrodes diminue bientôt, et enfin la décharge s'arrête; puis la même série de phénomènes se répète indéfiniment.

La période du courant dans la partie du circuit comprenant le tube se compose donc de deux parties: 1^o le temps nécessaire pour que la différence de potentiel des électrodes passe, de la petite valeur qu'elle a au moment où la décharge dans le tube s'arrête, à la valeur par laquelle la décharge commence, 2^o le temps, généralement plus court, pendant lequel la décharge existe.

Il est facile de voir que cette explication s'accorde

avec ce qu'on a dit à propos de l'influence de la force électromotrice, de la capacité et de la résistance sur la hauteur du son.

Observant dans un miroir tournant la tache lumineuse d'un tube de Braun près duquel est placée une petite bobine insérée dans le circuit dérivé, on a une confirmation nouvelle de l'explication donnée. Dans la figure 5 on voit: en *a* la ligne lumineuse qui apparaît lorsque les rayons cathodiques ne sont pas

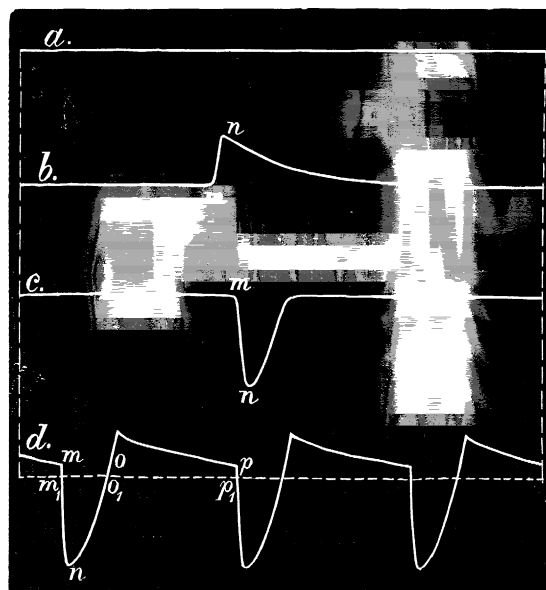


Fig. 5.

déplacés: en *b* l'effet d'une fermeture du courant en *bc* (fig. 1) après suppression du tube: en *c* l'effet d'une simple décharge dans le tube: en *d* enfin la courbe qui apparaît pendant l'expérience qui donne le son.

Il est possible de réaliser toute valeur de la période. Avec le plus petit nombre possible d'accumulateurs, avec une capacité C assez grande (1 microfarad) et avec une très grande résistance R , j'ai observé une décharge par seconde environ. Il ne s'agit donc pas en ce cas de son, mais de choes espacés. En variant la force électromotrice E , la capacité C , la résistance R on peut avoir des sons de toute hauteur jusqu'aux plus aigus.

Ainsi lorsque C est très petite (condensateur à air), E très grand et R relativement petite, la hauteur du son obtenu est très près de la limite supérieure d'audibilité, et si on le fait monter graduellement encore, ceux qui l'écoutent cessent de l'entendre l'un après l'autre.

Le téléphone T (fig. 1) peut être supprimé, particulièrement pour les sons aigus. Le son sort en effet très intense du condensateur à air, ce qui justifie le titre d'une Note Mémoire.

On ne peut pas expliquer ce phénomène par des vibrations des armatures (très massives et pas du tout flexibles), ni par les changements de dimensions des diélectriques dans le champ électrique (phénomène que j'ai mis en évidence en 1879), car le son peut être produit par un condensateur dont le diélectrique est l'air. Peut-être faut-il recourir, pour l'expliquer, à la contraction électrique des gaz prévue par Lippmann en 1881.

On voit donc que la production d'un son dans l'expérience décrite a lieu d'une manière tout à fait différente que dans la disposition de Duddell, évidemment à cause de l'emploi des grandes résistances, et de circuits dépourvus de self-induction.

3. On peut établir aisément la théorie du phénomène de la manière suivante :

Soient i , R , L l'intensité du courant, la résistance et le coefficient de self-induction du conducteur $Bbab$ (fig. 1); i_1 , R_1 , L_1 , les quantités analogues pour $bc dC$; i_2 , R_2 , L_2 pour beG , E la force électromotrice de B , C la capacité du condensateur, u la différence de potentiel aux électrodes du tube, v celle entre les armatures du condensateur. En ne tenant pas compte de l'induction mutuelle (ce qui est permis, vu la disposition des conducteurs), on peut écrire les équations :

$$\begin{aligned} E - u + Ri + L \frac{di}{dt} = 0 \quad u - v + R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} = 0 \\ -u + R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} = 0 \quad i_1 - i - i_2 = 0 \\ i_1 dt = -C dv. \end{aligned}$$

Dans le cas des expériences précédentes, on peut simplifier ces équations, en vertu de la circonstance que, n'employant pas de bobines, les inductances sont très petites. On aura donc :

$$\begin{aligned} E - u + Ri = 0 \quad u - v + R_1 i_2 = 0 \\ -u + R_2 i_2 = 0 \quad i_1 = i \quad i_2 = 0 \quad i_1 dt = -C dv. \end{aligned}$$

On en déduit :

$$\begin{aligned} v = E \frac{R_2}{R_1 + R_2} + k e^{-\frac{R + R_2}{C} t} \\ u = E \frac{R_2}{R + R_2} + k \frac{R R_2}{C} e^{-\frac{R + R_2}{C} t} \end{aligned}$$

ayant posé :

$$\zeta = R R_1 + R_1 R_2 + R_2 R.$$

Appliquant ces formules à la phase de charge, il faut poser $R_2 = \infty$. On trouve :

$$v = E - k e^{-\frac{t}{C(R + R_1)}} \quad u = E + k \frac{R}{R - R_1} e^{-\frac{t}{C(R + R_1)}}$$

Mais il faut déterminer la constante k . Désignons par U la différence de potentiel aux électrodes du

tube au moment où la décharge s'arrête. Si l'on compte le temps à partir de cet instant, on a :

$$U_0 = E + k \frac{R}{R + R_1}$$

et les valeurs de u , v deviennent :

$$\begin{aligned} v = E - \frac{R + R_1}{R} (E - U_0) e^{-\frac{t}{C(R + R_1)}}, \\ u = E - (E - U_0) e^{-\frac{t}{C(R + R_1)}}. \end{aligned}$$

La phase de charge continue jusqu'à ce que la différence de potentiel aux électrodes du tube arrive à la valeur U , par laquelle la décharge dans le tube commence. On en déduit, pour la durée t' de la phase de charge :

$$t' = C(R + R_1) \log \frac{E - U_0}{E - U}.$$

Cela fait, il faut calculer la durée t'' de la phase de décharge. Il faudra, à cet effet, déterminer la constante k par la condition que, pour $t = 0$, il faut avoir $u = U$. Le résultat auquel on parvient est le suivant :

$$t'' = \frac{C\zeta}{R + R_2} \log \frac{ER_2 - U(R + R_2)}{ER_2 - U_0(R + R_2)}.$$

La période T du son est donc :

$$\begin{aligned} T = t' + t'' = C(R + R_1) \\ \log \frac{E - U_0}{E - U} + \frac{C\zeta}{R + R_2} \log \frac{ER_2 - U(R + R_2)}{ER_2 - U_0(R + R_2)}. \end{aligned}$$

Cette formule peut se simplifier en raison du fait que R est toujours très grand par rapport à R_1 et R_2 . On peut donc écrire :

$$T = CR \log \frac{E - U_0}{E - U} + C(R_1 + R_2) \log \frac{U}{U_0}.$$

Cette formule montre, d'accord avec les résultats d'expérience, que T diminue (parce que $U_0 < U$) lorsque E augmente, et lorsqu'on augmente C ou R ; et plus précisément on voit que T est proportionnel à C et fonction linéaire de R .

Ce dernier résultat a été confirmé par des mesures de la hauteur des sons au moyen du sonomètre. Le tableau suivant donne pour différentes valeurs de R le

R (en ohm)	N	N'
500 . 10 ⁵	1485	1498
265 "	1695	1695
224 "	1985	1967
179 "	2595	2415
146 "	2876	2898
125 "	5568	5568
100 "	4065	4020

nombre de vibrations mesurées N , et le nombre N'

1. Voir les calculs détaillés dans le mémoire cité plus haut.

calculé avec la formule linéaire, après détermination des deux constantes au moyen de deux expériences.

D'autres expériences de mesure ont donné une vérification assez satisfaisante de la proportionnalité entre T et C.

4. Lorsqu'on introduit des inductances dans les circuits ($L_1 L_2 L_3$ fig. 1) on obtient des résultats très singuliers et d'autant plus différents de ceux qu'on vient de décrire, que les coefficients de self-induction des bobines employées sont plus élevés. L'ensemble des phénomènes semble indiquer qu'on réalise des conditions intermédiaires entre celles des phénomènes décrits plus haut et celles de l'expérience de Duddell.

Malheureusement les formules fondamentales écrites plus haut ne donnent pas de résultats simples et se prêtent à une discussion utile; il a donc fallu se limiter à une étude purement expérimentale, qui toutefois a donné des résultats très curieux. Pour éclaircir certains points on a employé souvent le tube de Braun et le miroir tournant. On a constaté ainsi, par exemple, que, pendant que dans la phase de charge il n'y a généralement pas de phénomène ondulatoire, on a presque toujours des oscillations très nettes dans la phase de décharge.

On a introduit d'abord la bobine L_1 (fig. 1) dans le circuit principal $baRB$. Le condensateur avait (comme toujours dans ces nouvelles expériences) une capacité très petite; c'était le condensateur à air décrit plus haut. On a trouvé que la bobine L_1 rendait le son plus aigu. Ainsi dans une expérience où $L_1 = 50$ henry on avait un son de 268 vibrations, pendant que sans L_1 le nombre était 522; mais L_1 avait une résistance de 10 000 ohms environ, et il fallait diminuer R de la même quantité pour constater l'effet dû à l'inductance seule. Le nombre de vibrations du son fut alors 557, ce qui confirme l'énoncé inattendu donné plus haut.

On obtient des effets bien plus intéressants lorsque une ou plusieurs bobines (comme L_2, L_3 de la fig. 1) sont introduites dans le circuit dérivé.

Quant à la hauteur du son on constate que pour des valeurs de l'inductance assez élevés, le son devient plus grave. Ainsi, le nombre de vibrations par seconde diminue lorsqu'on enfonce de plus en plus dans la bobine un faisceau de fils de fer. Mais avec des bobines de self-induction petite on peut avoir un résultat contraire.

En tout cas la hauteur du son dépend de l'inductance, mais non de la manière simple caractérisant l'expérience de Duddell, et l'on peut dire que les phénomènes ont pour cas limites, d'un côté ceux qui ont été décrits ici au début, de l'autre côté ceux du circuit Duddell. La hauteur du son dépend en effet des constantes du circuit principal et de celle du cir-

cuit dérivé. Mais des phénomènes inattendus et très singuliers se présentent aussi, dont l'explication ne paraît pas facile. En voici quelques-uns.

La présence d'une bobine L_2, L_3 dans le circuit du condensateur a d'abord cette curieuse conséquence, que certains sons ne peuvent pas se produire. Si en effet on fait varier d'une manière continue la résistance R, ou l'inductance de la bobine, ou la capacité du condensateur C il arrive que celui-ci, à un certain moment, se tait brusquement. Si alors on interrompt le circuit principal pour le fermer un moment après, le son du condensateur éclate de nouveau.

Ce n'est pas tout. Supposons, par exemple, que l'on augmente lentement et d'une manière continue la résistance non inductive R. La hauteur du son diminue graduellement pendant quelque temps; mais tout à coup un changement se produit, le son sautant brusquement à une hauteur moindre, sans que les sons intermédiaires soient produits. La hauteur du son diminue ensuite graduellement jusqu'à ce qu'il se produise un nouveau saut, et ainsi de suite.

On a des effets semblables en agissant d'une manière analogue sur l'inductance ou sur la capacité. Ce curieux phénomène de discontinuité des sons se produit de la meilleure manière lorsque par quelques essais préalables on proportionne convenablement les constantes, c'est-à-dire la résistance, la capacité *ecc.*

Une manière très commode pour reproduire ce phénomène consiste dans l'introduction graduelle d'un faisceau de fils de fer dans la bobine, sans la modifier autrement et sans changer ni résistance, ni capacité, ni force électromotrice de la batterie. Dans certaines conditions, faciles à réaliser, le phénomène est encore modifié, en ce que les changements de hauteur du son entre deux silences sont si peu marqués, qu'on peut dire que le condensateur donne tout simplement une succession de notes différentes qui forment une mélodie comme si l'on baissait successivement différentes touches d'un instrument de musique.

Un autre phénomène saisissant est la production rapidement alternée de deux notes différentes (ce qu'en musique on appelle un *trillo*). On l'obtient avec un peu d'adresse lorsqu'on arrête le mouvement très lent du faisceau de fils de fer au moment voulu, c'est-à-dire à l'instant où le son va changer de hauteur. Le son précédent et le son suivant sont alors émis avec une alternance régulière.

Des effets semblables à ceux qu'on vient de décrire peuvent être produits en approchant ou en éloignant d'une manière graduelle une masse métallique et la bobine de self-induction.

Des effets très complexes s'obtiennent lorsqu'on introduit en même temps les inductances dans le circuit dérivé et dans le circuit principal. On trouvera

quelques indications sur ces effets dans le Mémoire primitif qui contient aussi les courbes très instructives observées avec le tube de Braun et le miroir tournant, lorsqu'on approchait du tube une bobine

insérée, soit dans le circuit principal, soit dans le circuit dérivé, soit près du tube à décharges.

[Reçu le 25 décembre 1909.]
