**SUR LA BALANCE D'INDUCTION ET LE SONOMÈTRE ÉLECTRIQUE
DE M. HUGHES;**

PAR M. A. BERTIN.

M. Hughes a décrit, dans le *Philosophical Magazine* du mois de juillet 1879 ⁽¹⁾, un double instrument qui donne lieu à des expériences extrêmement curieuses.

Son principe est le même que celui des *inductomètres différentiels* connus dans la Science depuis quarante ans. La balance d'induction, avec ses quatre bobines, est une modification de l'*inductomètre* de Dove ⁽²⁾, et le sonomètre, qui n'en a que trois, est la reproduction de l'*inductionomètre* de Matteucci ⁽³⁾. Mais l'instrument de mesure a été changé; M. Hughes a substitué au galvanomètre le téléphone, qui, d'abord, est plus sensible et qui, ensuite, ne confondant pas les deux courants induits direct et inverse, permet de supprimer l'emploi du disjoncteur.

I. — BALANCE D'INDUCTION.

Les *fig. 1, 2 et 3* représentent l'appareil complet avec tous ses accessoires ⁽⁴⁾. La *fig. 1* en est la projection horizontale; on y voit la balance en A et B, et en S le sonomètre, dont nous ferons d'abord abstraction. La *fig. 2* est une coupe verticale de la balance; la *fig. 3* donne le détail des accessoires.

La *balance d'induction* se compose de deux paires de bobines A et B (*fig. 1 et 2*) (dans la *fig. 1* il faut d'abord supposer enlevée la règle R qui est sur le support B). Les bobines inférieures *a* et *a'* (*fig. 2*) sont les bobines inductrices; elles sont reliées par un fil caché sous la table. Le sens de l'enroulement du fil *y* est tel

⁽¹⁾ *Philosophical Magazine*, 5^e série, t. VIII, p. 50 à 56.

⁽²⁾ *Annales de Poggendorff*, t. XLIX, p. 72; 1840. — *Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, t. IV, p. 336.

⁽³⁾ Présenté au Congrès de Florence, en 1841. Voir les *Leçons sur l'induction* de Matteucci, p. 45.

⁽⁴⁾ Ces figures ont été prêtées par M. Ducretet, qui m'a procuré le nouvel appareil et qui a commencé à le reproduire.

qu'un courant qui les parcourt tourne dans les deux bobines en sens contraires. Ce courant leur est amené, par des fils également cachés, de la pile *Pi* (*fig. 1*), composée de 3 éléments Daniell, et il est interrompu par une roue dentée, mue par un mouvement d'horlogerie *Ho*. Ce mouvement fait tourner d'une vitesse uni-

Fig. 1.

forme la roue dentée, qui communique avec l'un des pôles de la pile, pendant que l'autre pôle est attaché à un petit ressort en platine *p* qui frotte contre les dents de la roue. Quand l'horloge est en mouvement, le courant est successivement ouvert et fermé dans les deux bobines inductrices *a* et *a'*.

Au-dessus de ces bobines s'en trouvent deux autres b et b' (*fig. 2*) qui reçoivent les courants induits; elles sont reliées entre elles par un fil, toujours caché sous la table, de telle sorte qu'un même courant les parcourrait en tournant dans le même sens. Leurs extrémités libres communiquent avec les boutons T, T, auxquels on attache les fils du téléphone Te; les bornes T, T permettent l'adjonction d'un second téléphone. Les bobines inductrices a et a' étant de sens contraires, les courants induits dans les bobines b et b' sont toujours de sens contraires, et le téléphone est silencieux si les deux courants induits sont égaux. Cette condition de silence n'est pas

Fig. 2.

obtenue immédiatement, parce que l'égalité des bobines n'est pas absolue; mais on peut toujours la produire en agissant sur la vis V, qui éloigne ou rapproche la bobine induite b' de la bobine inductrice a' : c'est toujours par là qu'il faut commencer.

On a cherché à rendre égales les deux bobines induites et les deux bobines inductrices; mais il n'est pas nécessaire que les premières soient égales aux secondes. C'est seulement une condition de maximum pour l'induction, qui est toujours proportionnelle au produit des nombres de spires des deux bobines agissant l'une sur l'autre. Les dimensions choisies par M. Hughes sont les suivantes: chaque bobine porte 100^m du fil n° 32; elles sont en buis; leur diamètre intérieur est de 3^{cm}, l'extérieur de 5^{cm},5; leur épaisseur est de 1^{cm}, et dans chaque groupe A et B elles sont séparées par un intervalle de 5^{mm}. Pour que les deux groupes ne puissent pas réagir l'un sur l'autre, l'auteur conseille de les éloigner de 1^m; en réalité, leur distance n'est que la moitié de celle-là dans l'appareil qu'il nous a envoyé.

M. Hughes s'est proposé d'étudier à l'aide de la balance l'influence des masses métalliques sur l'induction. Cette influence a déjà fait

l'objet de nombreux travaux qui commencent à Arago (1824) et finissent à Verdet (1851); elle se manifeste d'une manière inattendue dans les nouvelles expériences. Nous allons les passer en revue.

On voit en *Cl* (*fig. 1*) un organe très compliqué : c'est la *clef*. Elle n'est utile que pour mettre en communication successivement la balance et le sonomètre avec la pile. Qu'il nous suffise de savoir qu'en poussant la languette *M*, de manière que son extrémité libre repose sur le bouton métallique qui est à gauche, le circuit inducteur de la balance est fermé. Si ensuite nous poussons l'arrêt *m* de l'horloge, celle-ci se met en mouvement et le courant inducteur est interrompu régulièrement. Enfin mettons le téléphone à notre oreille et rendons-le silencieux en agissant sur la vis *V*; nous serons prêts pour expérimenter.

Expérience 1. — Plaçons dans les deux groupes de bobines *A* et *B* (*fig. 1* et *2*) les deux godets en bois *A* et *B* (*fig. 3*). Si nous

Fig 3.

mettons dans le godet *A* une pièce de 1^r, le téléphone, d'abord silencieux, deviendra très bruyant; une seconde pièce mise en *B* ne le fera pas taire en général, parce que les deux pièces ne sont pas parfaitement égales, soit en poids, soit en titre, soit en température, etc. On reconnaîtra facilement quelle est celle dont l'action est moindre en en approchant une pièce de 0^r,50 fixée normalement à l'extrémité d'une tige de bois *J''* (*fig. 3*). D'un côté elle

augmente le bruit du téléphone, de l'autre elle le diminue jusqu'à l'anéantir : c'est de ce dernier côté que se trouve la pièce la plus faible.

La sensibilité de la balance est telle, que, si le téléphone est silencieux parce que les deux godets renferment des pièces égales, il suffira de souffler sur un des godets, ou d'échauffer légèrement une des deux pièces avec les doigts pour que le téléphone se fasse entendre. La plus petite différence de titre dans des monnaies égales en apparence se reconnaît également.

En opérant successivement sur des disques de même diamètre et de même épaisseur, on constate l'inégale action des divers métaux.

Les sons correspondant à chaque métal diffèrent non seulement par leur intensité, mais encore par leur tonalité. Ainsi le fer doux donne un son étouffé, tandis que l'acier trempé donne des sons très aigus. M. Hughes attribue cette différence entre les métaux à une différence dans la rapidité de leur action inductive.

Expérience 2. — Les masses métalliques agissent ici comme les diaphragmes que nous introduisons dans les bobines induites pour affaiblir la tension du courant induit, et ces diaphragmes eux-mêmes agissent comme une bobine intérieure, qui recevrait l'induction si elle était fermée et ne produirait aucun effet si elle était ouverte. Ce sont des phénomènes connus.

Enlevons le godet que nous avons mis en A et introduisons à sa place la bobine E (*fig. 3*), dont les bouts du fil peuvent être à volonté réunis ou séparés : s'ils sont séparés, le téléphone se taira ; s'ils sont réunis, il fera entendre un bruit intense.

Expérience 3. — Répétons l'expérience avec la bobine plate H. L'effet sera le même si elle est horizontale ; mais si elle est verticale, le téléphone sera silencieux, que la bobine soit ouverte ou fermée : c'est que les courants induits ne peuvent pas se produire dans un circuit perpendiculaire au courant inducteur.

Expérience 4. — La même chose a lieu avec les disques métalliques. La tige de bois J' (*fig. 3*) est articulée à son extrémité et porte une pièce de 1^{re} qui lui est parallèle. Si on la place horizon-

talement sur le groupe A, le téléphone parlera si la pièce est horizontale; il se taira si la pièce est verticale et fera entendre un son d'intensité variable pendant qu'on tournera la tige sur elle-même.

Expérience 5. — Cette influence de la position du disque peut être facilement constatée sur tous les métaux non magnétiques; mais, pour les métaux magnétiques, elle s'exerce en sens contraire. Prenons le disque F (*fig. 3*); il est en fer ou en nickel, et il porte latéralement une tige normale à sa surface. A l'aide de cette tige, je l'introduis dans la bobine A : l'effet sera très faible si le disque est horizontal, très fort au contraire s'il est vertical.

Expérience 6. — La même chose aura lieu avec une spirale plate en fer : l'effet sera très faible si la spirale est horizontale, qu'elle soit ouverte ou fermée, l'induction dans le fer étant faible; le téléphone parlera au contraire très fort si cette spirale est verticale, et il sera encore indifférent de l'ouvrir ou de la fermer.

Expérience 7. — C'est que les métaux magnétiques peuvent agir de deux manières : comme diaphragmes, si leur dimension parallèle à l'axe de la bobine est petite, et comme aimants, si cette dimension est grande. Dans le premier cas, ils diminuent l'induction, dans le second cas ils l'augmentent. Cet antagonisme est mis en évidence par l'expérience suivante.

J'introduis le disque en fer F (*fig. 3*) entre les deux bobines *a* et *b'* du groupe A : l'effet, qui était faible quand le disque était dans le centre des bobines, devient très intense. J'introduis ensuite à côté, et cette fois dans l'axe des bobines, le faisceau de fil de fer attaché au support F' (*fig. 3*) : le téléphone, qui parlait très haut, parle maintenant tout bas, et on pourrait le faire taire en soulevant un peu le faisceau de fil de fer. Il est donc prouvé que ce faisceau agit en sens contraire du disque.

Expérience 8. — La balance rend sensible des variations de magnétisme qui doivent être très faibles. On le démontre avec les deux pièces T et T' (*fig. 3*). T' contient un fil de fer qui signale sa présence en A par le bruit du téléphone; T porte un fil plus long, qui est fixé par le bas et qui, à l'aide de la manette *f*, peut

être tordu. Placé en B, le fil T n'éteint pas complètement le bruit produit par le fil T' en A; mais il suffit de tordre légèrement le fil T pour que le téléphone redevienne silencieux.

Expérience 9. — On trouve dans ces phénomènes un moyen de mesurer la limite de sensibilité de la balance. L'introduction dans les bobines d'une tige de bois J (*fig. 3*) portant à son extrémité un petit fil de fer de 1^{mm} de long et de 0^{mm}, 1 de diamètre produit dans le téléphone un bruit appréciable. C'est même un moyen de reconnaître la délicatesse d'oreille nécessaire pour ces expériences : il faut qu'elle soit sensible à l'action de cette petite quantité de fer, dont le volume n'est pas le centième du millimètre cube, et qui ne pèse pas $\frac{1}{10}$ de milligramme.

On voit à l'autre extrémité de la même tige une petite spirale en cuivre très fin, d'un poids insignifiant, et qui forme un autre test-objet pour juger de la sensibilité de l'ouïe de l'observateur.

Après ce défilé des expériences que l'on peut faire avec la balance d'induction, le lecteur doit désirer apprendre comment on peut mesurer les effets produits. M. Hughes a imaginé pour cela plusieurs méthodes, dont aucune ne paraît le satisfaire complètement. Mais la méthode préférée est celle qui s'appuie sur l'usage du sonomètre; nous sommes ainsi appelés à nous occuper de cet instrument.

II. — SONOMÈTRE ÉLECTRIQUE.

Le sonomètre So (*fig. 1*) est un inductomètre à trois bobines verticales *a*, *b*, *c*. Les deux extrêmes sont les bobines inductrices; elles communiquent entre elles et avec le circuit général par des fils toujours cachés, suivant la détestable habitude des constructeurs; elles sont tournées de manière que le courant les parcourt en sens contraires. Elles sont fixées aux extrémités d'une règle horizontale de 250^{mm} de longueur, sur laquelle court une troisième bobine *b*, qui est la bobine induite. Les extrémités de cette bobine sont attachées aux boutons *t*, *t'*, qui communiquent avec les boutons T, T auxquels est attaché le téléphone. Ces bobines ne sont plus égales. L'auteur ne donne pas d'indications sur leurs dimen-

sions : on peut seulement remarquer que la bobine *a* est la plus épaisse et la bobine *c* la plus mince ; la bobine induite *b* est d'une épaisseur intermédiaire.

On ne peut pas mettre le sonomètre dans le circuit sans agir sur la clef *CL*. La partie principale de cette clef est un levier analogue à celui des clefs de Morse. Tant qu'on n'y touche pas, la balance est dans le circuit et le sonomètre n'y est pas ; c'est le contraire qui arrive quand on abaisse le levier en pressant sur le bouton *L*. Rien n'est donc plus facile que d'entendre alternativement le son de la balance et le son du sonomètre.

Le sonomètre, en effet, produit un son quand le courant interrompu le traverse ; les deux bobines inductrices *a* et *c* donnent des courants induits de sens contraires dans la bobine *b*, et ces courants, en passant par le téléphone, changent son état magnétique et le font parler s'ils ne sont pas égaux. Si donc, ayant le téléphone à l'oreille, on fait glisser la bobine induite *b* sur la règle, on trouve une position pour laquelle le téléphone est silencieux. C'est là qu'est le zéro de la règle. Dans notre appareil, il est à 5^{cm} de la bobine la plus mince *c* et à 20^{cm} de la bobine la plus épaisse *a*. Si l'on éloigne la bobine *b* du zéro, le son reparait plus ou moins fort et son intensité peut être indiquée par la division à laquelle la bobine est arrêtée.

Nous avons maintenant à comparer tous les métaux pris sous la même forme, celle de disques, et les mêmes dimensions, celles d'un schilling. Nous en mettons un dans le godet *A* de la balance : le téléphone donne un son produit par le métal. Pressons sur la clef : nous en entendrons un autre produit par le sonomètre, et nous le ferons varier en déplaçant la bobine induite *b*. En pressant alternativement sur la clef, nous entendrons successivement les deux sons et nous finirons par les rendre égaux. La bobine induite du sonomètre sera alors à une certaine division qui mesurera l'effet du métal : ce sera 115 pour un schilling, 52 pour un disque de fer de mêmes dimensions, 40 si c'est du plomb, etc. Cependant il ne faut pas oublier que ces mesures, que M. Hughes trouve faciles, sont en réalité très difficiles. Il arrive, je ne sais pourquoi, que les deux sons à comparer n'ont pas la même hauteur, et alors on hésite beaucoup à dire qu'ils sont égaux en intensité ; il faut certainement un apprentissage de l'oreille, que je n'ai pas eu le temps

de faire, et qui n'aboutit peut-être qu'à une illusion. Quoi qu'il en soit, voici les nombres trouvés par M. Hughes.

Je les appellerai *coefficients d'induction spécifiques*. J'ai mis à côté d'autres coefficients semblables, mais obtenus par d'autres méthodes par Babbage et Herschel et par Nobili : tous ces nombres ne s'accordent pas entre eux. Ils n'ont pas plus de rapports avec la conductibilité, dont la dernière colonne du Tableau contient les coefficients, empruntés à l'Ouvrage anglais de Latimer-Clark.

Métaux.	Coefficients d'induction			Coefficients de conducti- bilité électrique.
	d'après	d'après	d'après	
	M. Hughes.	Babbage et Herschel.	Nobili.	
Argent pur.....	125	»	»	100
Or.....	117	»	»	78
Argent des monnaies . . .	115	»	»	»
Aluminium.....	112	»	»	55
Cuivre	100	100	100	100
Zinc.....	80	93	30	29
Bronze	76	»	»	»
Étain	74	46	21	12,4
Fer ordinaire	52	»	»	15
Maillechort.....	50	»	»	12 à 16
Fer pur.....	45	»	»	»
Cuivre allié d'antimoine. .	40	»	»	»
Plomb.....	38	25	17	8,3
Antimoine	35	»	»	4,5
Mercure.....	30	»	»	1,6
Soufre allié de fer.	20	»	»	»
Bismuth.....	10	»	»	1,2
Zinc allié d'antimoine . . .	6	»	»	»
Éponge d'or pur	3	»	»	»
Charb. des cornues à gaz.	2	»	»	»

Les nouvelles expériences de M. Hughes excitent tout d'abord l'étonnement; mais, en réalité, elles ne sont qu'une application immédiate des lois connues de l'induction.

On sait que chaque interruption successive du courant inducteur produit deux courants induits, l'un *inverse*, l'autre *direct*, qui sont égaux en quantité et inégaux en *intensité*, ce dernier mot dé-

signant le quotient de la quantité par la durée du courant. Ces deux courants se montreront donc égaux dans tous les appareils qui ne mesurent que la quantité, tels que le galvanomètre et le voltamètre, tandis qu'ils se montreront inégaux dans tous les phénomènes qui dépendent de l'intensité, tels que la commotion, l'étincelle et l'aimantation de l'acier trempé. C'est ce dernier phénomène que l'on observe avec le téléphone, dont le bruit est le résultat du changement de magnétisme de l'aimant qui lui sert de noyau par le courant induit qui circule autour de cet aimant. On peut s'assurer que cet instrument est sensible aux deux courants induits, mais qu'il parle beaucoup plus fort quand il reçoit le courant direct, celui qui correspond à la rupture du courant inducteur. Si le téléphone reçoit à la fois les courants induits dans deux bobines de sens contraires, c'est comme s'il ne recevait que leur différence, et il restera silencieux quand les deux courants seront égaux.

L'introduction d'une bobine fermée dans la bobine induite produit un effet bien connu : elle augmente la durée de l'induction et par conséquent diminue l'intensité du courant induit ; son action sur le téléphone sera donc affaiblie. Le résultat sera le même si l'on remplace la bobine par une masse métallique dans laquelle puissent se développer des courants induits. Cette masse, qu'on appelle *diaphragme*, pourra avoir une forme quelconque, pourvu que ses dimensions parallèles à l'axe de la bobine ne soient pas trop petites. L'induction paraît devoir être d'autant plus facile que le corps est plus conducteur ; mais elle doit dépendre d'autre chose que de la conductibilité mesurée dans des fils.

Mais si le corps introduit dans la bobine est magnétique, si c'est du fer, par exemple, les résultats seront bien différents. Le fer s'aimante par le passage du courant, et cette aimantation augmente l'induction tout entière, aussi bien la quantité que l'intensité. Tous les effets sont donc augmentés, aussi bien les effets galvanométriques que les effets téléphoniques. Seulement, si le fer agit comme aimant, il agit aussi comme diaphragme métallique ; de là une complication qu'on fait disparaître en remplaçant le noyau en fer par un faisceau de fils de fer.