

le magnétisme fabrique de l'électricité

LES PHÉNOMÈNES RÉVERSIBLES ...ET CEUX QUI NE LE SONT PAS

PEU après la découverte de l'électromagnétisme, montrant que la passage du courant dans une bobine transforme cette dernière en un aimant, il était logique que les physiciens se mettent à voir si cet effet était réversible.

Autrement dit, si l'électricité engendre le magnétisme, pourquoi le magnétisme n'engendrerait-il pas de l'électricité ?

Le premier essai connu, effectué dans le but de voir si cela était vrai, fut fait, et manqué (de peu), par un physicien Suisse, si nos renseignements sont exacts.

Ayant vu qu'une bobine parcourue par du courant était l'équivalent d'un aimant, il se dit qu'il suffisait de placer un aimant dans une bobine pour qu'elle soit parcourue par du courant. Il relia donc une bobine à un galvanomètre sensible, mais prit la précaution de le faire par des fils très longs, car il avait remarqué que le déplacement de son aimant influençait son galvanomètre (ce dernier était probablement à aimant mobile, très sensible aux champs magnétiques).

Il mit l'aimant dans la bobine et s'en alla dans la pièce voisine où

se trouvait le galvanomètre pour voir si ce dernier déviait. Ayant vu que ce n'était pas le cas, il en conclut que le phénomène de l'électro-aimant n'était pas réversible. Après tout, il y a bien des phénomènes qui ne le sont pas : si vous envoyez de l'électricité dans un résistor, il chauffe, mais, si vous chauffez le résistor, il ne vous fournit pas de l'électricité.

Notre physicien manqua de peu la découverte de l'induction ; il la manqua parce qu'il n'avait pas fait ce raisonnement, qui nous semble évident de nos jours : « Si, en plaçant un aimant dans une bobine, on transforme cette dernière en source de courant, cela ne peut être que momentané, pendant que l'aimant bouge, par exemple ; sinon on arriverait à produire de l'énergie électrique à partir de rien, un aimant pouvant rester indéfiniment aimanté ».

Une autre raison fit qu'il ne trouva pas l'induction : il était Suisse. Nous tenons tout de suite à préciser que nous avons plusieurs amis Suisses et que nous apprécions beaucoup ce petit pays ; cela dit, il est connu que les Suisses manifestent généralement moins de... nervosité que les Français (nous les en félicitons !) et il y a lieu de penser que le physicien s'en vint d'un pas très calme dans la pièce où se trouvait le galvanomètre. L'instrument

avait donc eu le temps de revenir au zéro.

Si le physicien avait eu la précipitation (souvent abusive) qui caractérise nos compatriotes, ou surtout s'il avait été assisté d'un aide, il aurait vu que, lors de la mise en place de l'aimant dans la bobine, le galvanomètre déviait dans un sens, puis revenait assez vite à zéro. Lors de l'extraction de l'aimant hors de la bobine, le galvanomètre déviait de nouveau, dans le sens opposé, cette fois.

Il y a donc bien production d'électricité par introduction d'un aimant dans une bobine, ou par extraction de cet aimant hors de la bobine, mais **uniquement lorsque l'aimant bouge**.

TELLE EST L'« INDUCTION »

Donc, voici le phénomène, tel que vous pouvez le vérifier facilement :

Prenez (fig. 1) une bobine, par exemple celle que vous aviez réalisée pour des expériences d'électromagnétisme, et reliez-la à un simple milliampèremètre (la sensibilité importe peu).

Prenez alors un aimant, par exemple un modèle prévu pour la fermeture des portes, qui se rapproche un peu de l'aimant droit. Enfoncez-le dans la bobine, ou, si la taille du trou central de cette

dernière ne laisse pas passage à l'aimant, approchez un pôle de l'aimant aussi près que possible de l'ouverture de la bobine, en opérant assez rapidement : vous verrez l'aiguille du milliampèremètre dévier, par exemple vers la droite, puis retomber rapidement au zéro (fig. 1a).

Extrayez alors l'aimant hors de la bobine, ou écartez-le d'elle et l'aiguille va dévier en sens inverse (vers la gauche, ce qui sera un peu difficile à voir si l'appareil est à zéro à gauche, car l'aiguille dispose alors de peu de course à gauche de sa position de repos), puis revenir aussi vite au zéro (fig. 1b).

Dès que l'on a fait ces quelques expériences, on voit immédiatement l'importance du **mouvement** de l'aimant. Si un courant continu dans une bobine engendre bien une aimantation constante, la réciproque n'est pas du tout vraie.

Pour préciser les choses et donner quelques lois de cette production d'électricité par variation d'action magnétique, il faut introduire une notion nouvelle : celle de « flux magnétique ».

LA NOTION DE LIGNE DE FORCE

On définit un champ magnétique par la direction dans laquelle s'exerce l'action magnétique et

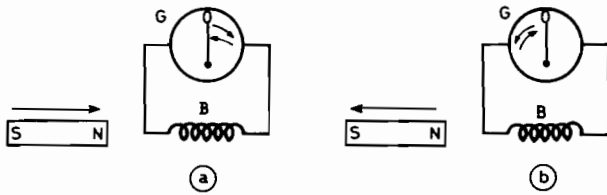


Fig. 1. - Lorsque l'aimant s'approche de la bobine (a) une tension est induite dans la bobine et le galvanomètre G dévie vers la droite, puis retombe. Si on écarte l'aimant (b), le galvanomètre dévie en sens opposé pendant que l'aimant bouge : c'est l'induction (production d'électricité par variation de flux magnétique).

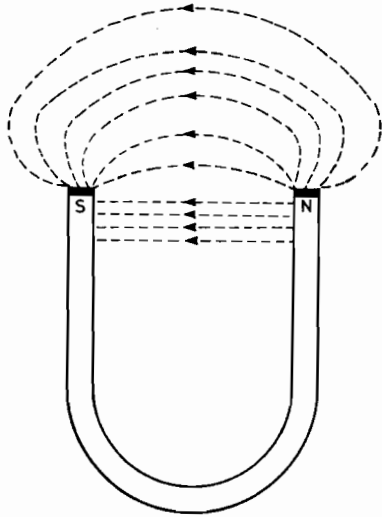


Fig. 2. - Les « lignes de force » d'un aimant peuvent se matérialiser par saupoudrage de limaille de fer d'une feuille de papier posée sur l'aimant.

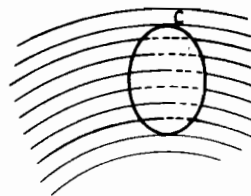


Fig. 3. - La présence d'un morceau de fer dans le champ de l'aimant montre sur le spectre magnétique que les lignes de force se « concentrent » dans le fer.

Fig. 4. - On peut compter, en quelque sorte, le « flux » magnétique dans une surface comme le nombre de lignes de force qui traversent une surface appuyée sur le contour C.

par la force de celle-ci. On pourrait (la méthode est peu pratique, mais pas impossible tout de même) définir ce champ grâce à une aiguille aimantée. En effet, cette dernière s'oriente d'elle-même, sous l'influence du champ, dans la direction du champ ; en l'absence d'aimant, l'aiguille s'oriente sous l'influence du champ magnétique de la Terre, et son extrémité bleue indique le nord magnétique, voisin du nord géographique.

Donc, la direction de cette aiguille nous renseigne sur la direction du champ. Mais nous pouvons en savoir plus : si nous écartons l'aiguille de la position qu'elle tend à prendre, elle y revient en effectuant une série d'oscillations autour de cette position. Si le champ magnétique est intense, ces oscillations seront rapides (à courte période) ; si l'on a affaire à un champ faible, l'aiguille oscille lentement, avec une grande période.

Une étude théorique montre que la période d'oscillation de

l'aiguille est inversement proportionnelle à la racine carrée de la force du champ. En d'autres termes, quand le champ quadruple d'intensité, la période des oscillations est divisée par deux (racine carrée de quatre). Si le champ est multiplié par onze, par exemple, la période des oscillations est réduite dans le rapport 3,32 (car $\sqrt{11} \approx 3,32$).

Notre boussole va donc nous permettre d'étudier parfaitement le champ magnétique autour d'un aimant. La direction de l'aiguille nous donne celle du champ et la période d'oscillation de la dite aiguille nous permet de calculer la force relative du champ.

En particulier, nous allons tracer une sorte de « carte » du champ. Imaginons un mobile qui se déplacerait en suivant tout le temps la direction de l'aiguille aimantée : il va décrire une trajectoire constamment tangente à cette direction. La ligne ira du pôle nord de l'aimant vers son pôle sud.

Bien sûr, entre les pôles d'un

aimant en fer à cheval, les lignes en question sont des droites, joignant les deux pôles par le chemin le plus court. Mais en dehors de pôles (fig. 2), les lignes en question s'écartent et divergent avant de se rassembler vers l'autre pôle.

Ces lignes ne sont pas uniquement une vue de l'esprit. On peut facilement les mettre en évidence, et c'est une expérience intéressante à faire.

Il suffit de rassembler un peu de limaille de fer dans une enveloppe et de placer un aimant à plat sous une feuille de papier plane et horizontale. En laissant tomber la limaille sur la feuille, surtout si l'on tapote un peu cette dernière, on voit les brins de limaille s'orienter dans le champ de l'aimant, s'accrocher les uns aux autres, et tracer les lignes de force tout à fait comme elles sont représentées sur la figure 2.

Une première constatation s'impose : là où les lignes de force sont serrées les uns contre les autres, le champ magnétique est intense (au voisinage des pôles).

En revanche, les zones qui correspondent à des lignes de force éloignées les unes des autres sont celles où le champ magnétique a une faible intensité.

Bien entendu, il ne saurait être question de dénombrer les lignes de force : il y en a une infinité, puisque, par chaque point de l'espace, on peut en faire passer une. Mais on peut ne considérer que certaines d'entre elles, par exemple toutes celles qui sont issues des points d'intersection des lignes d'un quadrillage serré, tracé sur un des pôles. On pourra donc parler de zones où les lignes de force sont serrées et de zones où elles sont distantes, alors qu'il s'agit d'une notion très conventionnelle.

Cette idée du « serrage » des lignes de force peut se matérialiser facilement comme suit : On trace le « spectre magnétique » au moyen de limaille de fer, comme on l'a fait sur la figure 2, mais en plaçant près de l'aimant un petit morceau de fer, tel qu'on le voit en pointillé sur la figure 3.

Il sera probablement nécessaire de maintenir ce morceau de fer pour éviter qu'il vienne se coller sur un des pôles de l'aimant.

Lorsque l'on fait tomber la limaille sur l'ensemble de l'aimant et du morceau de fer, le tout recouvert d'une feuille de papier, on voit apparaître le spectre que représente la figure 3. On remarque sur ce spectre que les lignes de force se concentrent dans la région du morceau de fer, montrant bien que la présence de ce dernier renforce le champ magnétique en son voisinage.

COMPTONS LES LIGNES DE FORCE

Cette idée un peu arbitraire des lignes de force que l'on peut compter va nous permettre de définir ce que l'on appelle le « flux magnétique ».

Considérons (fig. 4) une surface délimitée par un contour C : il y a un certain nombre de lignes de force qui percent la dite surface. On dit alors que le « flux magnétique » passant dans cette surface est proportionnel à ce nombre. Cette définition est donnée par analogie avec le flux de liquide qui peut traverser une boucle de fil, en remplaçant les lignes de force par des petits jets d'eau.

On conçoit donc très bien comment varie ce flux. En premier, il varie avec la force du champ, laquelle est, comme on l'a vu, liée au serrage des lignes de force. Sur la figure 5, on voit que le même contour est traversé par un nombre de lignes de force élevé quand ces lignes sont serrées (fig. 5a), ce qui correspond à un champ intense, alors que, si les lignes sont peu serrées (fig. 5b), ce qui correspond à un champ peu intense, il y a peu de lignes de force qui passent dans le contour : le flux est plus faible.

On voit immédiatement que la surface de la zone traversée par les lignes compte dans la valeur de ce flux. Sur la figure 6a, une petite surface située sur le passage des lignes de force est traversée par un plus petit nombre de ces lignes qu'une grande surface (fig. 6b).

Enfin, une dernière grandeur intervient : l'orientation de la surface par rapport aux lignes de force. Dans les figures 4, 5 et 6, nous avons supposé que les lignes de force étaient à peu près perpendiculaires à la surface appuyée sur le contour C. Mais, si cette

surface s'incline par rapport aux lignes de force, il en passera moins à travers la dite surface. On le voit sur la figure 7 : en (a) il passe plus de lignes de force dans la surface qu'en (b).

Pour ceux qui aiment plus de rigueur mathématique, nous dirons que, dans une petite surface s , située dans un endroit où le champ magnétique est H , la direction de ce champ faisant un angle a avec la perpendiculaire à la surface, le flux s'exprime par : $\Phi = s H \cos(a)$ (fig. 8)

Le terme en cosinus est là pour exprimer dans quel rapport la surface s doit être « réduite » quand on la regarde suivant la direction du champ magnétique.

En effet, si vous prenez une surface d'un centimètre carré (un carré de 1 cm de côté) et que vous en fassiez l'ombre sur un mur au moyen d'une source de lumière très lointaine (rayon parallèle), dont les rayons sont perpendiculaires au mur, si le carré de 1 cm de côté est parallèle au mur, son

ombre sera un carré égal, de même surface par conséquent ; les rayons « voient » le carré avec sa dimension réelle. Maintenant, inclinons le carré de 60° par rapport au parallélisme avec le mur, la rotation étant effectuée autour d'un des côtés du carré, côté qui reste parallèle au mur, la surface de l'ombre est réduite de moitié, elle n'est plus que $0,5 \text{ cm}^2$, réduite dans le rapport $0,5$ qui est précisément le cosinus de l'angle de 60° .

Mais, rassurez-vous, il n'est nullement indispensable d'être un « fort en trigonométrie » pour comprendre la notion de flux. L'image du « nombre de lignes de force traversant une surface » suffit parfaitement pour s'en faire une idée déjà très nette.

L'unité de flux magnétique est le Weber, soit le flux produit dans une surface de 1 m^2 par un champ de 1 Tesla, constant et perpendiculaire à la surface en question. On employait, auparavant, l'unité Maxwell, qui vaut un cent-millionième de Weber ($1 \text{ Wb} = 10^8 \text{ M}$).

FLUX MAGNÉTIQUE ET TENSION INDUITE

Maintenant que nous connaissons le flux magnétique, nous pouvons donner une définition plus précise de l'induction : c'est l'apparition d'une tension (dite « induite ») dans un bobinage quand le flux magnétique qui traverse ce bobinage varie.

Pour donner une valeur chiffrée plus précise, nous dirons que cette tension est proportionnelle à la « vitesse de variation » du flux (façon détournée de dire qu'il s'agit de la « dérivée » du flux par rapport au temps).

Donc, si nous voulons produire une tension induite dans une spire de bobinage, nous disposons de trois moyens :

- faire varier la surface de ce bobinage dans le temps (peu pratique et presque jamais utilisé) ;
- faire varier l'intensité du champ magnétique (ce que l'on

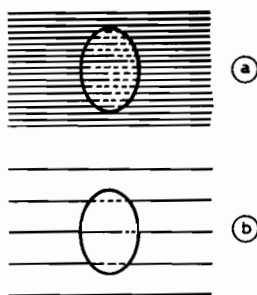


Fig. 5. - Dans un champ fort (a) les lignes de forces sont plus « serrées » que dans un champ faible (b). Il y a donc plus de flux dans une même surface si le champ est fort.

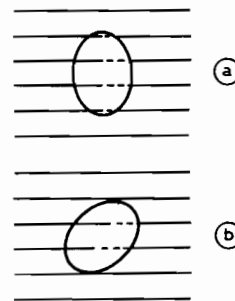


Fig. 7. - Dans un même champ, une même surface reçoit moins de lignes de force si elle est inclinée (b) que si elle est bien perpendiculaire aux lignes (a).

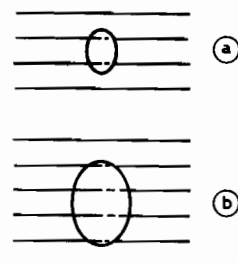


Fig. 6. - Dans un même champ (le « serrage des lignes de force est le même ») une petite surface (a) reçoit moins de flux qu'une grande (b). Le flux varie donc proportionnellement à la surface.

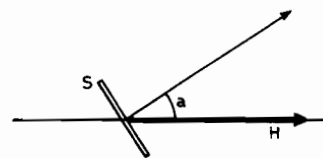


Fig. 8. - Dans une petite surface S soumise à un champ H faisant un angle a avec la perpendiculaire à la surface, le flux est donc proportionnel à S , à H et au cosinus de l'angle a .

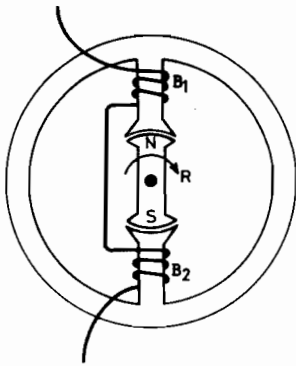


Fig. 9. — On utilise le phénomène de l'induction pour produire de l'électricité en faisant tourner un aimant, le « rotor » R près de bobines B₁ et B₂.

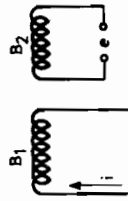


Fig. 10. — On induit aussi une tension dans la bobine B₂ en faisant VARIER le courant i dans la bobine B₁ : c'est l'« induction mutuelle », principe de base des transformateurs.

faisait en rapprochant ou éloignant l'aimant) ;

— faire varier l'orientation des spires par rapport à la direction du champ.

C'est cette dernière méthode que l'on emploie dans tous les générateurs de courant utilisant l'induction. On utilise l'énergie mécanique fournie par une turbine (à eau, à vapeur, ou à air dans les roues éoliennes) pour faire tourner des aimants (ou, plus exactement, des électro-aimants excités par du courant continu de petite puissance) devant des bobines. La variation continue de flux dans ces bobines engendre une tension, elle aussi continuellement variable, qui est ce que l'on appelle une tension « alternative ».

C'est la raison pour laquelle la découverte de l'induction est tellement fondamentale ; sans elle, il n'y aurait pratiquement jamais eu de distribution d'électricité, pour des quantités de raisons, en particulier par suite du fait que, sans l'induction, la production d'énergie électrique aurait été une entreprise ruineuse. Il suffit de faire le bilan énergétique d'une pile de bonne qualité pour voir que le prix du kilowatt-heure fourni par des piles est 3 000 à 50 000 fois plus cher que celui que nous fournit l'E.D.F.

Toute l'énergie électrique que nous consommons a l'induction pour origine ; toutes les centrales électriques sont des installations « faisant varier du flux dans des bobines ». L'origine de l'énergie mécanique qui fait bouger les aimants devant les bobines peut être très variée (chute d'eau, chaleur solaire, pétrole, vent, énergie nucléaire, etc.) ; dans tous les cas, la production d'électricité se fait par induction.

Tous les alternateurs dérivent, plus ou moins directement, du modèle simplifié que représente la figure 9. On y trouve un aimant (ou électro-aimant) tournant, nommé « rotor » (R) et des bobines fixes, faisant partie du « stator », soit B₁ et B₂. C'est dans ces bobines que se produit la tension induite que l'on va utiliser.

On complique le modèle de la figure 9 en constituant le rotor de plusieurs aimants et le stator d'autant de paires de bobines qu'il y a d'aimants dans le rotor. Le principe est toujours le même.

C'est encore le même principe que l'on utilise dans la dynamo, qui fournit du courant à peu près continu ; mais, cette fois, on commande, par le même axe que l'aimant du rotor, un système d'inverseur à contacts, constitué d'un « collecteur » et de balais, qui redresse l'alternatif au fur et à mesure que la tension induite dans les bobines le produit.

Ces machines (alternateurs et dynamos) convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique. Quand on ne fait rien débiter aux bobines du stator, le rotor tourne sans freinage. Dès que l'on commence à utiliser la tension induite dans les bobines, c'est-à-dire à consommer du courant, le passage de courant dans les bobines engendre des champs magnétiques qui agissent sur l'aimant tournant : ce dernier commence à être freiné, et il faut fournir de l'énergie mécanique pour le faire tourner.

CAS DE LA BOBINE INDUCTRICE

Nous avons vu que les alternateurs de forte puissance utilisent plutôt des électro-aimants que

des aimants pour leurs rotors. Il s'agit simplement là d'une nécessité technologique : on obtiendra plus de champ magnétique dans de plus grosses pièces au moyen des électro-aimants qu'avec de simples aimants. En plus, il sera possible de faire varier la force du champ magnétique du rotor en modifiant le courant dit « d'excitation » qui passe dans les bobines de ce rotor (précisons que la puissance électrique correspondant à l'excitation est très faible par rapport à celle que l'on peut recueillir dans les bobines du stator).

Imaginons maintenant que l'on utilise un électro-aimant fixe qui envoie du flux dans une bobine. Le seul moyen de faire varier ce flux, donc d'engendrer une tension induite dans la dite bobine, est de faire varier le courant qui passe dans l'électro-aimant.

Nous obtenons donc l'ensemble qui est représenté sur la figure 10 : une bobine dite « inductrice », B₁, dans laquelle on envoie un courant variable, envoyant du flux dans une bobine dite « induite », B₂, dans laquelle la variation de flux engendre une tension induite e .

Ces deux bobines sont dites « couplées ». Si l'on envoie dans la première un courant qui varie de p Ampères par seconde, il y aura induction dans la seconde d'une tension $M \times p$, le coefficient M indiquant l'influence de la première bobine sur la seconde.

En envoyant dans la seconde bobine, B₂, un courant qui varie de q Ampères par seconde, on induira dans la première, B₁, une tension qui vaut : $M' \times q$.

L'étude expérimentale du phénomène, ainsi que des calculs, permettent de montrer que les coefficients M et M' sont égaux.

On donne donc à ce coefficient unique le nom de « coefficient d'induction mutuelle des deux bobines ». On le compte en « Henrys ». Deux bobines ont un coefficient d'induction mutuelle de 1 H si l'on obtient dans l'une d'elles une tension induite de 1 V quand le courant qui passe dans l'autre varie de 1 A/s (ampère par seconde).

Pour améliorer le couplage des bobines, c'est-à-dire pour faire en sorte que la quasi-totalité des lignes de forces produites par la bobine inductrice passe par la bobine induite, une bonne solution consiste à prévoir un « noyau magnétique », généralement en fer, autour duquel sont bobinés les deux enroulements, aussi bien B₁ que B₂.

C'est le principe de la réalisation des « transformateurs », bien connu des lecteurs de la revue. Il s'agit de deux bobines couplées par induction mutuelle, réalisées sur un noyau de tôles de fer. Dans la bobine inductrice, dite ici « primaire », on envoie un courant qui varie sans cesse (un courant alternatif). On recueille alors dans la bobine induite (dite ici « secondaire ») une tension induite que l'on peut utiliser.

L'intérêt du transformateur est double :

- il permet de disposer au secondaire d'une tension plus faible (transformateur **abaisseur**) débitant une intensité plus élevée, ou d'une tension plus forte (transformateur **élevateur**) avec une intensité moindre qu'au primaire ;
- il réalise un isolement électrique entre le primaire et le secondaire.

Un transformateur peut avoir plusieurs secondaires, séparés électriquement si c'est nécessaire. Il peut avoir, au primaire, des enroulements avec des prises intermédiaires, pour pouvoir être adapté à un secteur de 110 V ou à un secteur de 220 V. Si le primaire comporte N tours et que le secondaire en comporte P , la tension secondaire sera voisine du produit par P/N de la tension primaire, l'intensité débitée par le secondaire étant voisine du produit par N/P de celle que consomme le primaire (nous parlons d'égalités approximatives car le transformateur n'a pas un rendement rigoureusement égal à 100 %, mais il peut s'en approcher nettement).

(à suivre)

J.P. OEHMICHEN
Ingénieur E.P.C.I.