

Remarque :

Toutes les informations de cette page sont disponibles en version animée (en Flash) à l'adresse suivante:
<http://www.bbemg.be/fr/index-cem/electricite-champs/electromagnetisme.html>

Introduction

L'électromagnétisme étudie les interactions à distance des charges, des courants et des champs électrique et magnétique. C'est en 1873 que James Clerk Maxwell a regroupé les quatre équations fondamentales qui permettent de décrire l'ensemble des interactions.

Exemples d'interactions à distance des charges:

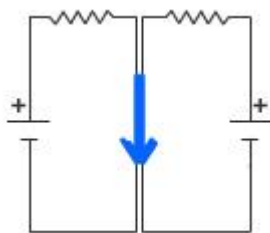
Deux aimants dont les pôles opposés se font face s'attirent.



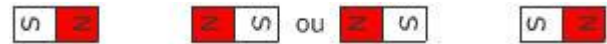
Deux charges de signes opposés s'attirent.



Deux conducteurs parcourus par un courant allant dans le même sens s'attirent.



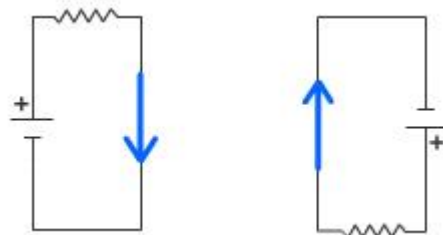
Deux aimants dont les pôles identiques se font face se repoussent.



Deux charges de même signe se repoussent.



Deux conducteurs parcourus par un courant allant dans des sens opposés se repoussent.



Etrange... Magique...

Et non ! C'est électromagnétique.
 Reprenons tout cela calmement !

Interactions liées au champ électrique

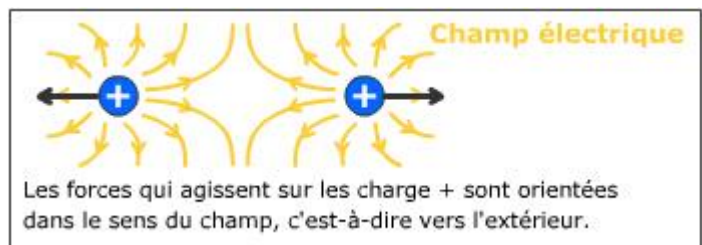
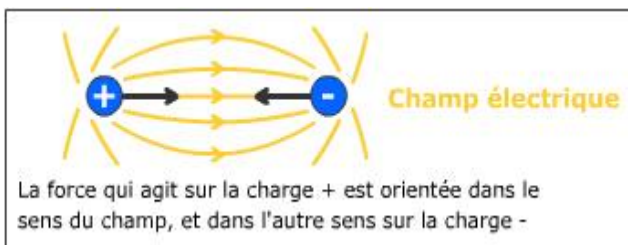
Comme nous l'avons vu dans "Concept de champ", les charges génèrent un champ électrique. Ce qui va nous intéresser en électromagnétisme, c'est la force que le champ électrique exerce sur les autres charges présentes. Cette force est exprimée par la formule suivante :

$$\text{Force (en newton, N)} \leftarrow \vec{F} = q \cdot \vec{E} \rightarrow \begin{array}{l} \text{Chargé électrique (en coulomb, C)} \\ \text{Champ électrique (en newton/coulomb, N/C)} \end{array}$$

Il s'agit de la force de Lorentz. F et E sont surmontés d'une flèche pour insister sur le fait qu'il s'agit de grandeurs vectorielles, c'est-à-dire qui ont une direction et un sens.

La force qui s'exerce sur les charges dépend du signe de la charge : par convention, la force exercée sur une charge $+$ a le même sens que le champ électrique, tandis que la force exercée sur une charge $-$ va dans le sens opposé.

Illustrons ceci au travers de deux exemples :



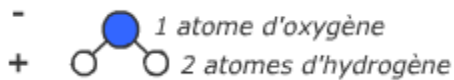
Dans ces exemples, le champ électrique est continu : il est orienté des charges $+$ vers les charges $-$. En courant alternatif, le sens du champ électrique varie à la même fréquence (par exemple, 50 Hz) : le champ électrique change de sens 100 fois par seconde.

Dans un matériau bon conducteur, le champ électrique entraîne le déplacement des charges. C'est le courant de conduction : le déplacement des charges est à l'origine d'un courant électrique.

Dans un matériau isolant, le champ électrique crée des dipôles par polarisation des molécules ou réoriente les dipôles existants (*). C'est le courant de déplacement. L'intensité du courant de déplacement dépend de la capacité du matériau à se polariser.

(*) Un dipôle est une molécule qui possède un côté chargé positivement et un côté chargé négativement.

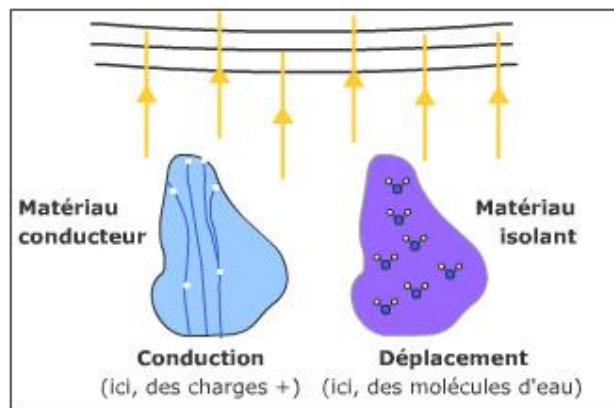
Prenons un exemple :
La molécule d'eau (H₂O) est un dipôle car l'atome d'oxygène est chargé négativement tandis que les deux atomes d'hydrogène sont chargés positivement.



Les molécules d'eau auront donc tendance à s'orienter selon le sens du champ électrique. Le champ à 50 Hz réoriente les molécules d'eau 100 fois par seconde.

C'est ce courant de déplacement qui est à l'origine du chauffage des aliments dans un four à micro-ondes qui, comme nous l'avons vu dans "Concept de champ" génère un champ alternatif à 2450 MHz, c'est-à-dire variant plus de 1000 millions de fois plus rapidement.

Les courants de conduction et de déplacement sont les courants induits par un champ électrique variable (ici à 50 Hz). Ils se déplacent alternativement dans les deux directions, à la fréquence du champ inducteur.



Remarque :

Le courant de conduction existe que le champ soit continu (jusqu'à ce que les charges équilibrent le champ électrique) ou variable, alors que le courant de déplacement n'existe que si le champ est variable.

Interactions liées au champ magnétique

Le champ magnétique est observé via la force magnétique. Cette dernière s'exerce uniquement sur les charges en mouvement : c'est la force de Lorentz. Elle est exprimée par la formule suivante :

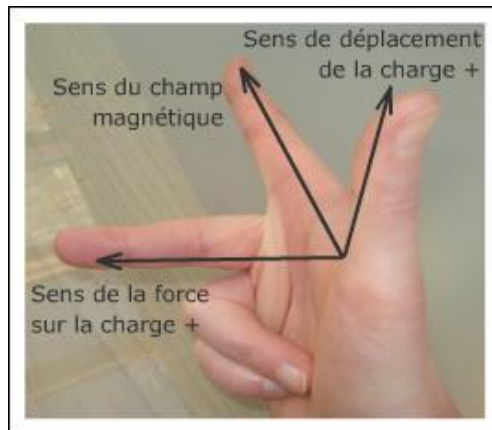
$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

Force (en newton, N) Charge électrique (en coulomb, C) Vitesse (en mètre/seconde, m/s) Champ magnétique (en tesla, T)

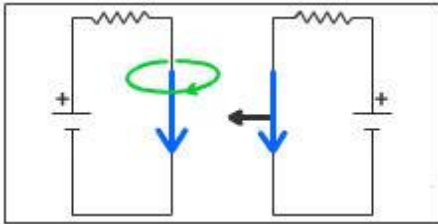
La force qui s'exerce sur les charges dépend du signe de la charge, de sa vitesse de déplacement et du

sens du champ. Il s'agit de la force de Lorentz. F et B sont surmontés d'une flèche pour insister sur le fait qu'il s'agit de grandeurs vectorielles, c'est-à-dire qui ont une direction et un sens.

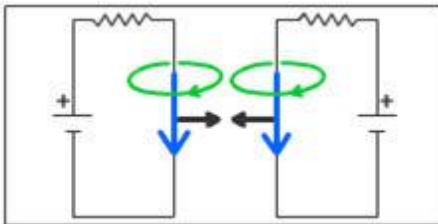
Le sens de la force est donné par la règle des trois doigts de la main droite : le pouce indique le sens de déplacement de la charge $+$ (sens opposé pour une charge $-$), l'index le sens du champ et le majeur le sens de la force sur une charge $+$.



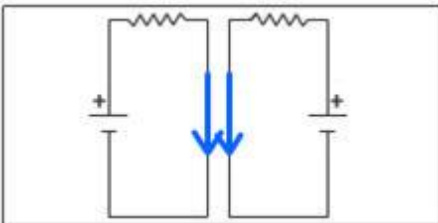
Commençons par illustrer la force exercée par un champ magnétique continu et uniforme :



Le champ magnétique du fil de gauche exerce une force sur le fil de droite : c'est la force de Laplace, qui dépend de l'intensité du courant, du champ magnétique et de la longueur du fil.



Le champ magnétique du fil de droite exerce également une force sur le fil de gauche.



Deux fils parcourus par des courants allant dans le même sens ont donc tendance à s'attirer, mais la force exercée est très faible.

Remarque : le champ magnétique autour du fil est très faible.

Dans les exemples précédents, nous étions en présence d'un champ magnétique continu. La situation est différente en présence d'un champ magnétique variable.

Suite aux observations d'Ørsted en 1820 (voir "Concept de champ"), Michael Faraday avait émis l'hypothèse que les champs magnétiques pouvaient également produire un courant. En 1831, il observe

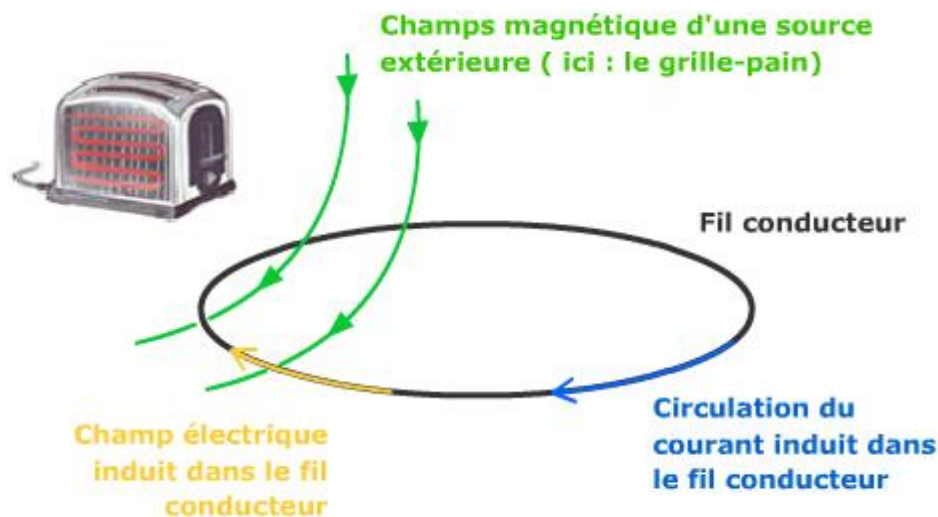
effectivement l'induction d'un courant, mais uniquement en présence d'un champ magnétique variable (*).

(*) En se basant sur les observations d'Oersted, Faraday pensait que toute circulation de courant dans un circuit génère un champ magnétique capable lui-même de générer un courant dans un second circuit placé à proximité du premier.

Mais ses premières expériences, en courant continu, ne lui permirent pas de vérifier son hypothèse : aucun courant ne circulait dans le second circuit.

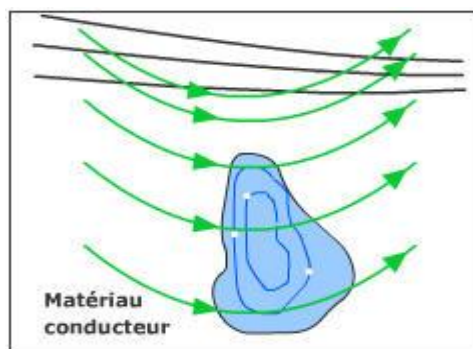
Par contre, il observa lors de l'ouverture ou de la fermeture de l'interrupteur, la circulation d'un courant dans le second circuit. Il en déduit que c'était la modification de la quantité de champ magnétique traversant une surface donnée, c'est-à-dire le flux magnétique, qui était à l'origine de ces courants induits.

Plus précisément, le champ magnétique variable crée une force électromotrice à l'origine d'un champ électrique. Ce dernier génère alors la circulation d'un courant : c'est le courant induit. Il s'agit de la loi de Faraday.



Les **courants induits** génèrent à leur tour un champ magnétique qui s'oppose aux modifications de flux qui leur ont donné naissance. C'est la loi de Lenz.

Lorsqu'un matériau conducteur est placé dans un champ magnétique variable, il apparaît dans celui-ci un champ électrique qui génère à son tour des courants induits circulaires, appelés "courants de Foucault".

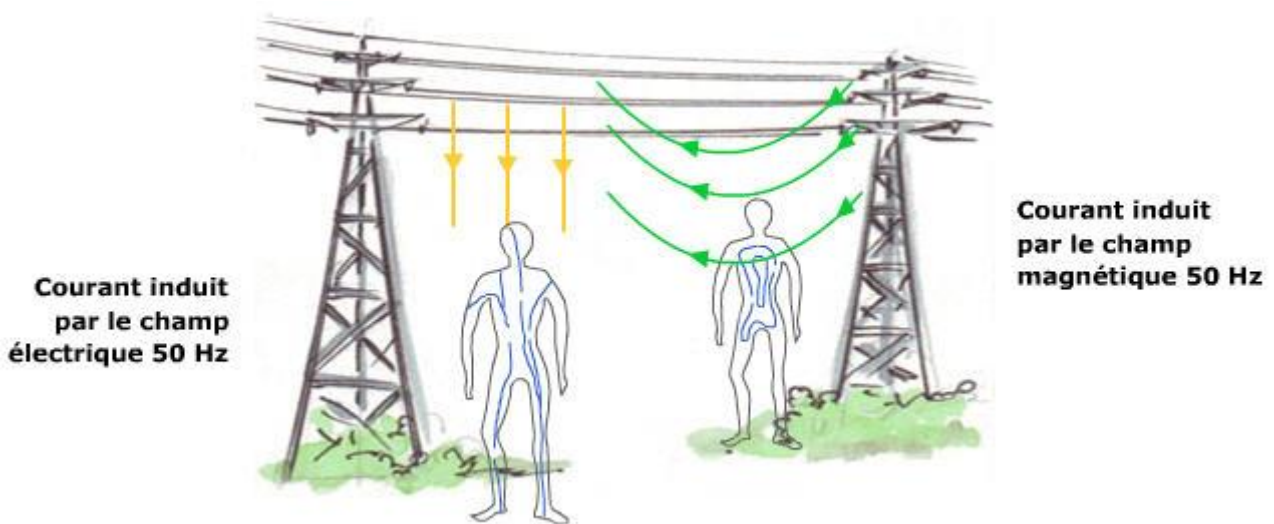


L'expérience montre que les phénomènes magnétiques sont influencés par la présence de certains matériaux : il s'agit des matériaux diamagnétiques, paramagnétiques et ferromagnétiques. Ils se distinguent par leur perméabilité magnétique, c'est-à-dire par leur faculté à canaliser l'induction magnétique : ils concentrent le flux magnétique et augmentent la valeur de l'induction magnétique.

Par contre, les matériaux isolants tels que la pierre, le bois sec ou le PVC n'influencent pas la répartition du champ magnétique.

Au niveau du corps humain

Le corps humain peut être considéré comme étant un bon conducteur de l'électricité. Dans un champ variable (par exemple de manière sinusoïdale avec une fréquence de 50 Hz comme le réseau d'énergie électrique), le corps sera parcouru par un courant à la même fréquence que celle du champ ambiant.



Le **champ électrique externe variable** ne pénètre que très partiellement le corps : pour un champ électrique externe de quelques kV/m, il reste seulement quelques mV/m dans le corps. Il provoque principalement la migration des charges à la surface de ce dernier. Il en résulte donc des courants sur la surface du corps et un courant résiduel à l'intérieur du corps.

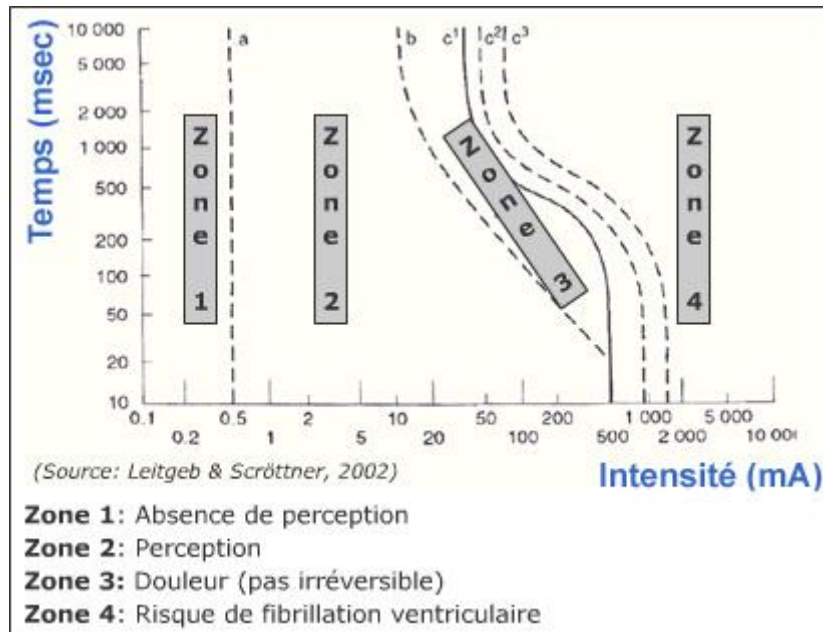
Le **champ d'induction magnétique externe variable** n'est que très légèrement perturbé par la présence du corps. Des boucles de courant vont apparaître dans le corps afin de tenter d'annuler le champ externe. Dans des conditions normales d'exposition au champ magnétique à 50 Hz, ces courants induits restent bien en deçà des valeurs des courants naturels du corps humain (courants dits "endogènes") : pour un champ externe de 0,15 mT, les courants induits seront environ 5000 fois plus faibles que les courants endogènes. (*)

(*) Le critère d'établissement des normes d'exposition aux champs de basses fréquences est d'éviter des densités de courants induits supérieures à celles qui se produisent naturellement dans le corps. En 50 Hz, les restrictions de base (ou valeurs limites d'exposition) sont de 10 mA/m² pour les travailleurs et de 2 mA/m² pour la population générale.

Pour de plus amples informations sur le sujet, nous vous proposons de consulter la page **La question du risque sur la santé**, accessible à partir de l'onglet "Santé" de notre site

Perception des champs 50 Hz

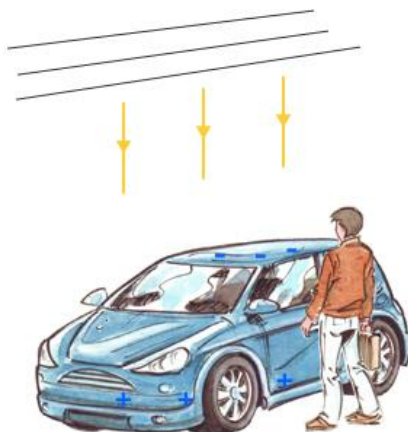
Comme nous venons de le voir, un champ électrique n'induit que de très faibles courants dans le corps. En général, ces courants sont imperceptibles car ils sont trop peu intenses pour exciter les cellules nerveuses et les muscles. Le seuil de perception est variable d'une personne à l'autre.



Lorsque le champ électrique dépasse un seuil de 20 kV/m, nous percevons un léger fourmillement à la surface de la peau et les poils se dressent. C'est le phénomène de piloérection. C'est le même genre de phénomène que fait se dresser les cheveux sur la tête en électricité statique.

Sous certaines conditions, nous pouvons également percevoir le champ électrique de manière indirecte :

- a. **Sensation d'un léger choc électrique en touchant une masse métallique isolée du sol et placée par exemple sous une ligne à haute tension : c'est le phénomène de couplage capacitif.**



La voiture sous la ligne à haute tension est soumise au champ électrique : il induit un déplacement des charges. La voiture acquiert ainsi une certaine tension, différente de celle à laquelle se trouve le personnage.

Lorsque ce dernier touche la structure métallique, il y a équilibrage des tensions (*). Le choc électrique peut être désagréable, mais n'est pas dangereux.

C'est à ce genre de phénomène que peuvent être soumis les animaux, s'abreuvant dans une mangeoire métallique placée sous une ligne à haute tension. La solution consiste à mettre correctement la mangeoire à la terre.

(*) Ce phénomène ressemble à une décharge électrostatique, mais diffère par la quantité de courant déchargé et la durée de la décharge.

b. Tube fluorescent qui s'éclaire

Lorsqu'on tend un tube fluorescent vers les câbles conducteurs d'une ligne à haute tension, celui-ci s'éclaire faiblement. Pourquoi ? Le champ électrique de la ligne génère une tension induite dans le tube, qui provoque l'excitation du gaz situé à l'intérieur du tube, aboutissant finalement à l'émission de lumière.

Remarque : Le fonctionnement du tube fluorescent est décrit dans Usages de l'électricité.

c. 3) Bruit lié à l'effet couronne

L'effet couronne est un phénomène caractéristique des champs électriques très intenses. Il se manifeste par un halo lumineux autour des câbles à haute tension. Il désigne la présence de décharges partielles autour des conducteurs d'une ligne aérienne, sous certaines conditions (*). Ces décharges sont à l'origine d'un bruit pouvant être désagréable.

(*) La présence de petites saillies à la surface des conducteurs, comme par exemple les gouttes d'eau, les flocons de neige ou encore des insectes, produisent de fortes augmentations du champ électrique. L'effet de couronne varie donc nettement en fonction des conditions extérieures et atmosphériques.

L'exposition à un champ magnétique n'induit également que de très faibles courants dans le corps. Aux valeurs d'exposition usuellement rencontrées, ils sont imperceptibles, tout comme les courants induits par le champ électrique.

Seule une exposition à des champs magnétiques beaucoup plus intenses peut amener à une perception directe. Par exemple, pour un champ magnétique de 10 mT à 50 Hz (c'est-à-dire environ mille fois la valeur maximale obtenue en dessous d'une ligne à haute tension), des scintillements lumineux apparaissent dans le champ visuel. Ce sont les magnétophosphènes. Ces scintillements, réversibles, sont dus à des courants induits au niveau de la rétine. Dès que l'exposition cesse, ces petits courants cessent immédiatement. Il n'y a pas de phénomène d'accumulation de ces effets lors d'exposition répétées comme ce serait le cas avec, par exemple, les rayons X.

Sous certaines conditions, nous pouvons également percevoir le champ magnétique de manière indirecte, notamment en cas d'interférence avec un appareil électrique :

Le bon fonctionnement d'un appareil électrique peut être perturbé par le champ électromagnétique émis par un autre dispositif électrique se situant à proximité du premier. Les perturbations causées par ce champ électromagnétique sont appelées interférences électromagnétiques. Pour éviter ces interférences, il est nécessaire de veiller à la compatibilité électromagnétique des appareils électriques.

Remarque :

Il importe de ne pas confondre les effets biologiques et les interférences d'un champ électromagnétique avec un dispositif électronique. Certains matériaux sont très sensibles aux champs magnétiques de basses fréquences. Par exemple, l'écran cathodique d'un ordinateur peut être perturbé par un champ magnétique de l'ordre de 1 μ T. Les interférences sont dues à la fréquence de "rafraîchissement" de l'affichage au niveau de l'écran, une fréquence proche de 50 Hz.

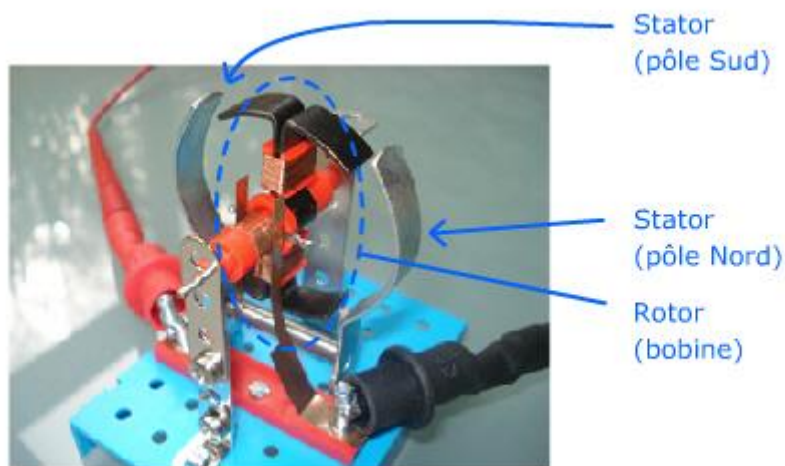
Des exemples d'utilisation des propriétés des champs

Les propriétés des champs électriques et magnétiques 50 Hz sont exploitées dès la production et le transport de l'énergie électrique. Voyons ici plus en détail le fonctionnement d'un alternateur et d'un transformateur. Dans "Usages de l'électricité", nous parlerons de leurs applications dans des appareils électriques d'usage courant.

1. L'alternateur

Les alternateurs des centrales électriques convertissent l'énergie mécanique apportée par l'eau, le vent, la vapeur, la fission nucléaire ... en énergie électrique. Les tensions générées par les alternateurs vont de 10 à 20 000 Volts (10 à 20 kV) en Belgique.

Comment les tensions sont-elles générées ? Pour comprendre le principe de fonctionnement de l'alternateur, nous avons monté une bobine (le rotor) sur un axe placé entre les 2 pôles d'un aimant permanent (le stator).



Le principe de fonctionnement est relativement simple : il consiste à faire se déplacer des bobines dans un champ magnétique de manière à induire des forces électromotrices. Avec le dispositif ci-dessous (et le procédé d'entraînement du rotor est un peu archaïque!), la force électromotrice induite est de 124 mV.



(Voir l'animation Flash via le lien <http://www.bbemg.be/fr/index-cem/electricite-champs/electromagnetisme.html>)

Le rotor est constitué d'une bobine (plus précisément de deux bobines mises en série) que la rotation fait passer alternativement à proximité des pôles nord et sud du stator. Le champ magnétique qui traverse les boucles de la bobine varie donc au rythme de la rotation et induit une force électromotrice alternative de fréquence correspondante.

Dans une centrale électrique, le stator n'est pas composé d'aimants permanents, mais bien d'électro-aimants. Ces derniers permettent d'atteindre des forces électromotrices induites beaucoup plus élevées.

L'alternateur des centrales de production d'électricité induit une tension alternative à 50 Hz. La fréquence dépend de la vitesse de rotation du rotor. La tension est triphasée, ce qui signifie que les forces électromotrices induites aux bornes du rotor sont décalées dans le temps : on dit qu'elles sont déphasées. En 50 Hz, les trois phases sont déphasées de 6,7 millisecondes. Le triphasé est obtenu en triplant les bobines du rotor et en les répartissant uniformément.

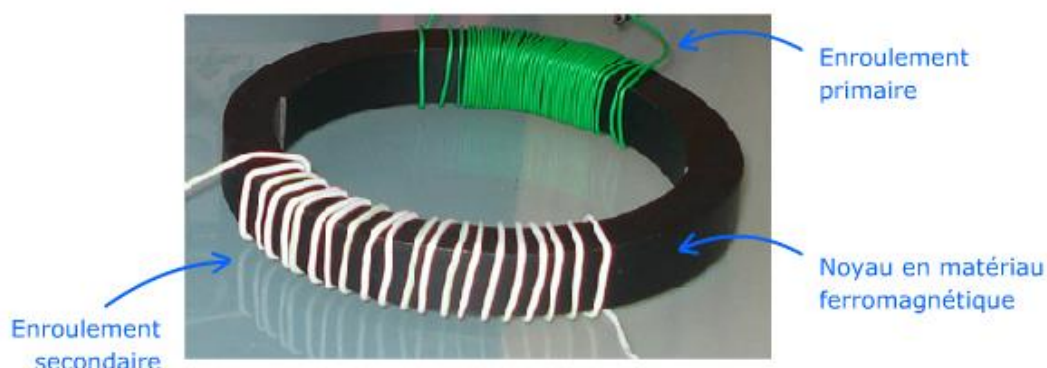


L'alternateur produit de l'énergie électrique à partir de l'énergie mécanique. Nous verrons dans "Usages de l'électricité" qu'un moteur universel fonctionne tout simplement selon le principe inverse : l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique (rotation du moteur).

2. Les transformateurs

Les transformateurs sont largement utilisés aussi bien au niveau du transport et de la distribution d'électricité, qu'au niveau de certains de nos appareils électriques. Ils sont destinés soit à élever la tension, soit à l'abaisser. Nous reviendrons sur l'utilité des uns et des autres dans "Trajet de l'électricité".

Voyons ici le principe de fonctionnement d'un transformateur qui abaisse la tension : c'est le rapport entre le nombre de boucles dans les deux enroulements qui détermine le rapport de la tension au primaire et au secondaire.



(Voir l'animation Flash via le lien <http://www.bbemg.be/fr/index-cem/electricite-champs/electromagnetisme.html>)

Dans l'exemple montré ci-dessus, les enroulements primaire (fil vert) et secondaire (fil blanc) sont respectivement composés de 40 et 20 boucles. La tension au secondaire sera abaissée de moitié par rapport à la tension au primaire.

La tension obtenue au niveau de l'enroulement secondaire est de même fréquence et de même forme que celle reçue par l'enroulement primaire. Les puissances qui y transitent sont également conservées.

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

The diagram shows the transformer voltage ratio formula $\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s}$ with four blue arrows pointing from the terms to their respective labels:

- From V_p to "Tension au niveau du primaire (en volt, V)"
- From V_s to "Tension au niveau du secondaire (en volt, V)"
- From N_p to "Nombre de boucles au niveau du primaire"
- From N_s to "Nombre de boucles au niveau du secondaire"

Quiz

Pour accéder au Quiz, suivre le lien suivant: <http://www.bbemg.be/fr/index-cem/electricite-champs/electromagnetisme.html>

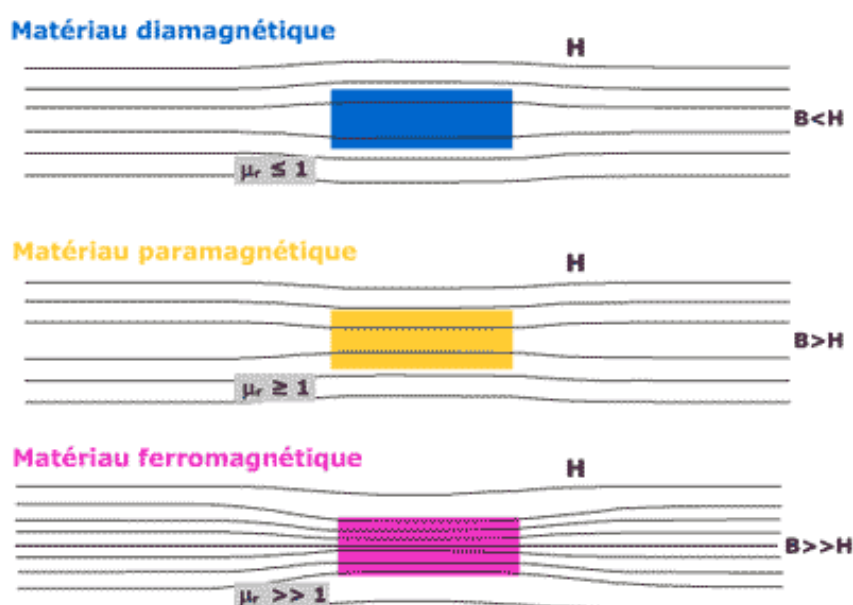
Annexes

1. Les propriétés magnétiques des matériaux

Les matériaux diamagnétiques (Argent, Cuivre, Eau, Or, Plomb, Zinc ...), paramagnétiques (Air, Aluminium, Magnésium, Platine ...) et ferromagnétiques (Cobalt, Fer, Mumetal, Nickel ...) se distinguent par leur perméabilité magnétique.

Dans Concept de champ, nous avons vu que le champ magnétique H et le champ d'induction magnétique B sont reliés, dans un matériau donné, par la relation dite "constitutive" : $B = \mu * H$. La perméabilité magnétique du matériau (μ) s'exprime par le produit de la perméabilité du vide (μ_0 , exprimée en Henry/mètre) et de la perméabilité relative (μ_r , sans dimension):

- μ_0 est une constante universelle, elle vaut $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m
- μ_r dépend du matériau.



Les matériaux diamagnétiques et paramagnétiques présentent des valeurs de perméabilité proche de 1. La perméabilité absolue μ des matériaux diamagnétiques et paramagnétiques est donc pratiquement égale à celle du vide, c.à.d. $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

La perméabilité des matériaux ferromagnétiques n'est pas constante mais dépend du champ magnétique H . Pour de faible valeur de H , la valeur de μ_r peut être très élevée mais elle décroît avec la valeur de H et peut redevenir unitaire au delà d'un certain seuil en raison d'une saturation. Pour cette raison, nous indiquons ci-dessous des valeurs maximales de perméabilité relative (à 20°C) :

Cobalt : 250 / Fer : 10 000 / Mumetal : 100 000 / Nickel : 600

Remarque : Les matériaux à haute perméabilité magnétique (en particulier le Mumétal) sont des candidats potentiels pour le blindage contre les champs magnétiques. Leur utilisation nécessite cependant de prendre de grandes précautions au risque de perdre leur efficacité.

2. La compatibilité électromagnétique

La compatibilité électromagnétique, c'est "l'aptitude d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement." (Source : Directive européenne 2004/108/CE du 15 décembre 2004)

Pour illustrer la compatibilité électromagnétique, prenons l'exemple des pacemakers.

Le pacemaker (ou stimulateur cardiaque, ou pile) est un dispositif implanté dans l'organisme délivrant des impulsions électriques au cœur et permettant de réguler les battements cardiaques en cas de dysfonctionnement.

Qu'en est-il de son fonctionnement dans des zones à fortes concentrations de champs ?

Avec les pacemakers actuels, réglés en mode bipolaire avec une sensibilité ventriculaire courante (2mV en général), le risque d'interférence est quasi inexistant pour les expositions rencontrées couramment. Les pacemakers réglés en mode unipolaire ou avec une sensibilité importante sont plus sujets aux interférences. [...] Il est recommandé de ne pas utiliser de petits moteurs (type appareil de bricolage, perceuse) à proximité immédiate du boîtier du pacemaker (Souques, 2004).

Par mesure de précaution dans les milieux professionnels où des champs élevés peuvent être rencontrés, il est conseillé de demander au cardiologue quel type de pacemaker est implanté, sa programmation et son niveau d'immunité aux champs électriques et magnétiques. Avec ces précisions, le médecin du travail sera à même d'informer les employés à ce sujet.

Pour de plus amples informations sur le sujet, nous vous proposons de consulter la page [Travailleurs avec pacemakers](#) du BBEMG ou de contacter l'équipe ACE de l'Université de Liège l'[équipe ACE](#).

Référence : Souques, M. (2004). Influence des champs électromagnétiques non ionisants sur les dispositifs cardiaques médicaux implantables. La Presse Médicale, Vol 33, N° 22 - décembre 2004, pp. 1611-1615.