

UAA6 : L'électromagnétisme

I- LE CHAMP MAGNÉTIQUE

- 1) Aimants et pôles
- 2) Les pôles
- 3) Le champ magnétique et sa représentation
 - a) Définition
 - b) Expériences (voir vidéo)
 - c) Le vecteur induction magnétique
 - d) Exemples de spectres magnétiques (topographie d'un champ magnétique)

II- CHAMP MAGNÉTIQUE CRÉÉ PAR UN COURANT

- 1) Cas d'un courant passant dans un fil rectiligne
 - a) Expérience d'Oersted
 - b) Intensité du vecteur induction magnétique B
- 2) Cas d'un courant passant dans un conducteur circulaire (une spire)
 - a) Détermination des pôles
 - b) Intensité du vecteur induction magnétique B au centre de la spire
- 3) Spectre magnétique au voisinage d'une bobine
 - a) Définition
 - b) Spectre magnétique
 - c) Intensité du vecteur induction magnétique au centre de la bobine
 - d) Introduction d'un noyau de fer dans une bobine

III- L'UTILISATION DES ÉLECTROAIMANTS

IV- LA FORCE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

- 1) Mise en évidence de la force électromagnétique
- 2) Principe du haut-parleur
- 3) Le moteur électrique

V- INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

- 1) La loi de Lenz
- 2) Applications et incidences
 - a) Les plaques chauffantes par induction
 - b) Champ magnétique terrestre
 - c) Incidences des rayonnements électromagnétiques sur la santé

UAA6 : L'électromagnétisme

I- Le champ magnétique

1) Aimants et pôles

Un aimant est un corps capable d'exercer une force attractive à distance sur le fer et ses dérivés, les corps **ferromagnétiques**. (Ex : Co, Ni, acier,...)

Cette propriété attractive se trouve à l'état naturel dans la magnétite, un oxyde de fer (Fe_3O_4).

Ce minerai était connu dans l'Antiquité se trouvait notamment aux environs de la ville de Magnésie dans l'Asie Mineure (en Lydie, Turquie).

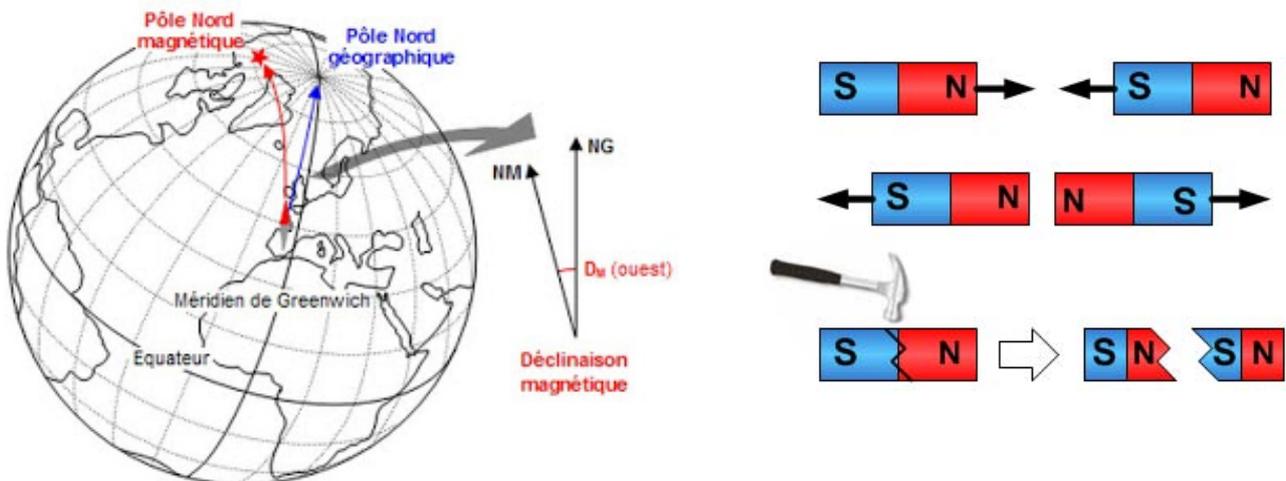
Les Grecs l'ont appelé *Pierre d'Héraklea* (Thalès de Milet) ou encore *Pierre lydienne* (Sophocle) avant de la désigner par *magnes* (Euripide-Platon).

2) Les pôles

Si l'on veut ramasser de la limaille de fer avec un aimant, on s'aperçoit **que l'attraction se manifeste principalement au voisinage des extrémités appelées pôles de l'aimant.**



Lorsqu'on laisse une aiguille aimantée (boussole) se diriger librement, on remarque qu'elle se stabilise toujours suivant la même direction qui est approximativement la direction Sud-Nord géographique.



On appellera par convention Pôle Nord de l'aiguille aimantée son extrémité pointant vers le nord, et pôle Sud l'autre extrémité

Deux pôles de même nom se repoussent et deux pôles de noms différents s'attirent.

Il est impossible d'isoler le pôle nord du pôle sud d'un aimant. Si on brise un aimant, on obtient 2 petits aimants comportant chacun un pôle sud et un pôle nord.

3) Le champ magnétique et sa représentation

On sait qu'une charge électrique modifie les propriétés de l'espace qui l'entoure en créant des forces électriques. On dit alors qu'il règne un champ électrique dans l'espace.

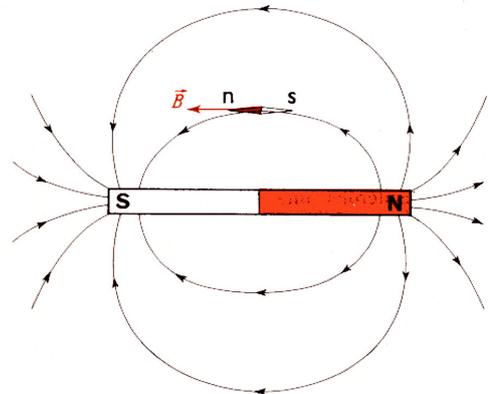
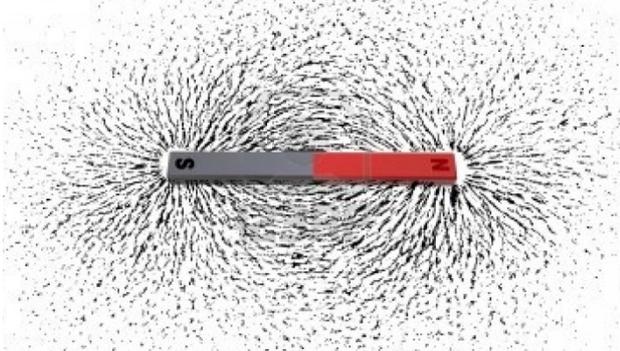
Un aimant modifie les propriétés de l'espace qui l'entoure en créant **des forces magnétiques**. Par analogie avec le champ électrique on dit alors qu'il existe un **champ magnétique** dans l'espace qui entoure un aimant.

a) Définition

Un champ magnétique est une région de l'espace dans laquelle une petite aiguille aimantée est soumise à l'action d'un couple de force.

b) Expériences (voir vidéo)

En saupoudrant de la limaille de fer sur un aimant droit, on s'aperçoit que les grains de limaille se disposent suivant des courbes:

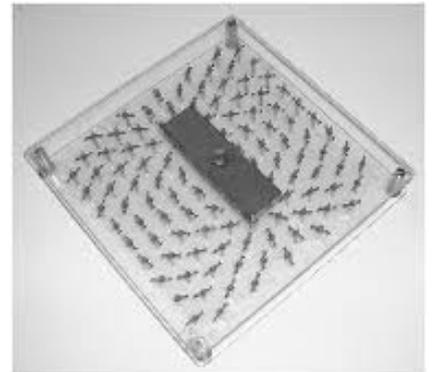


Ces courbes sont appelées **lignes de champ magnétiques** et l'ensemble de ces lignes constituent le **spectre magnétique** de l'aimant.

Si l'on positionne une petite aiguille aimantée mobile autour d'un axe en différents points de la plaque : celle-ci se stabilise à chaque position

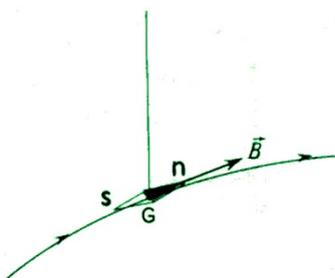
- dans une direction privilégiée tangente à la ligne de champ passant par le point
- avec un sens qui est conventionnellement celui qui va du pôle sud au pôle nord de l'aiguille aimantée.

Il suffit donc de placer toute une série d'aiguilles aimantées autour d'un aimant et de voir les directions qu'elles prennent pour étudier la forme d'un champ magnétique autour de l'aimant.



c) Le vecteur induction magnétique

Pour caractériser un champ magnétique, on va donc utiliser un vecteur appelé **vecteur induction magnétique** \vec{B} qui sera défini en chacun des points du champ.



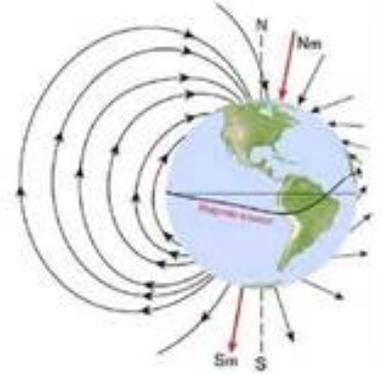
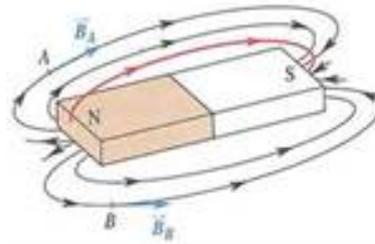
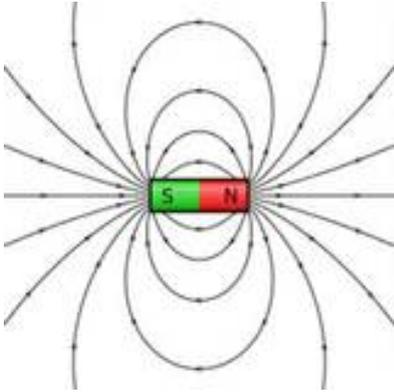
- **Ligne d'action:** droite tangente à la ligne de champ au point considéré
- **Sens :** par convention qui part du pôle Nord et se dirige vers le pôle Sud de l'aiguille aimantée.
- **Intensité** du champ magnétique: unité **Tesla T** (voir ultérieurement comment la calculer).

Remarque:

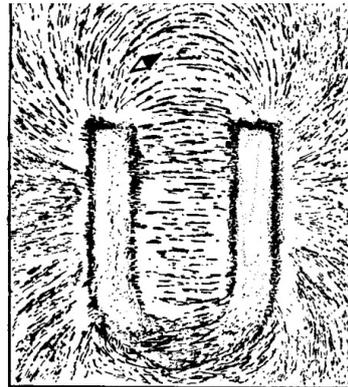
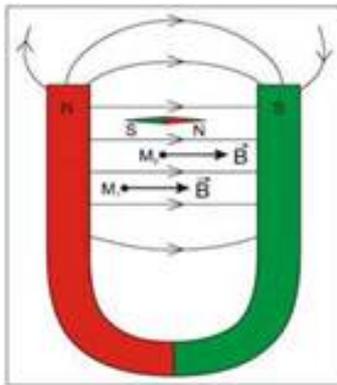
- l'ordre de grandeur du champ magnétique d'un aimant droit est de l'ordre de quelques millièmes de tesla
- La valeur du champ magnétique terrestre est de l'ordre de quelques 10^{-5} tesla.

d) Exemples de spectres magnétiques (topographie d'un champ magnétique)

Il existe une infinité de lignes d'induction magnétique.



Dans l'entrefer du fer à cheval (aimant en U) le champ magnétique est **uniforme** (vecteurs \vec{B} identiques en tout point)

**II- Champ magnétique créé par un courant****1) Cas d'un courant passant dans un fil rectiligne****a) Expérience d'Oersted**

En 1819, Oersted (Copenhague) était occupé à montrer à ses élèves les effets thermiques du courant électrique dans un conducteur, lorsque son attention fut attirée par un phénomène inattendu.

Il remarqua qu'une aiguille aimantée, qui se trouvait par hasard dans le voisinage du conducteur, déviait chaque fois que celui-ci était traversé par un courant électrique.

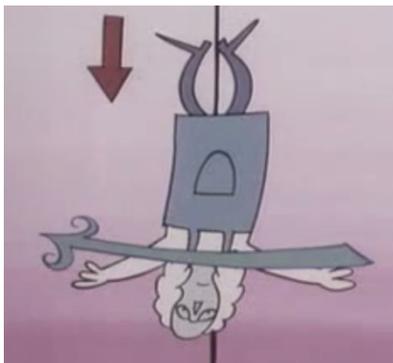
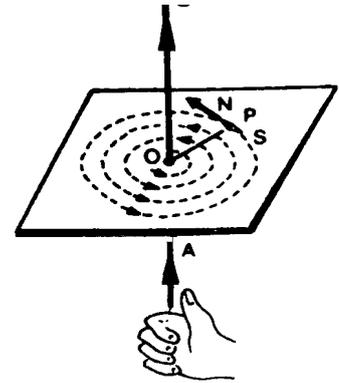
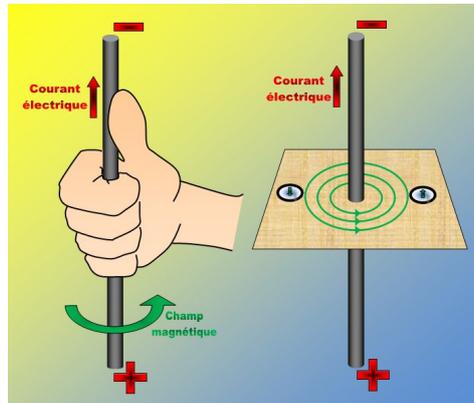
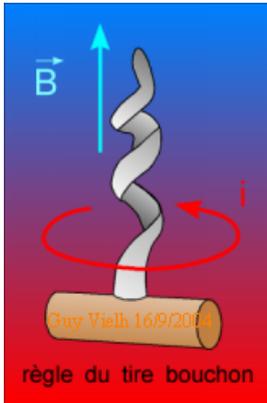
Il put alors constater que l'aiguille aimantée tentait chaque fois de prendre la direction normale au conducteur et que lorsqu'on inversait le courant, l'aiguille inversait la direction de son pôle nord.

(éléments de physique T.3, Delaruelle et Claes)

De par son expérience, Oersted mettait en évidence un lien entre le courant électrique et l'existence d'un champ magnétique.

Lorsqu'on examine le spectre magnétique obtenu, on s'aperçoit que les lignes de champ sont des circonférences concentriques se trouvant dans un plan perpendiculaire au courant électrique.

Le **sens** des lignes de champ est conforme à la règle du tire-bouchon ou règle de la main droite ou règle du petit bonhomme d'ampère:



Le bonhomme a le courant qui lui passe par les pieds et voit le champ magnétique circuler de sa droite vers sa gauche

b) Intensité du vecteur induction magnétique B

On remarque que l'intensité de B est :

- proportionnelle à l'intensité du courant: i
- et inversement proportionnel à la distance d du point au fil (d très petit par rapport à la longueur du fil)

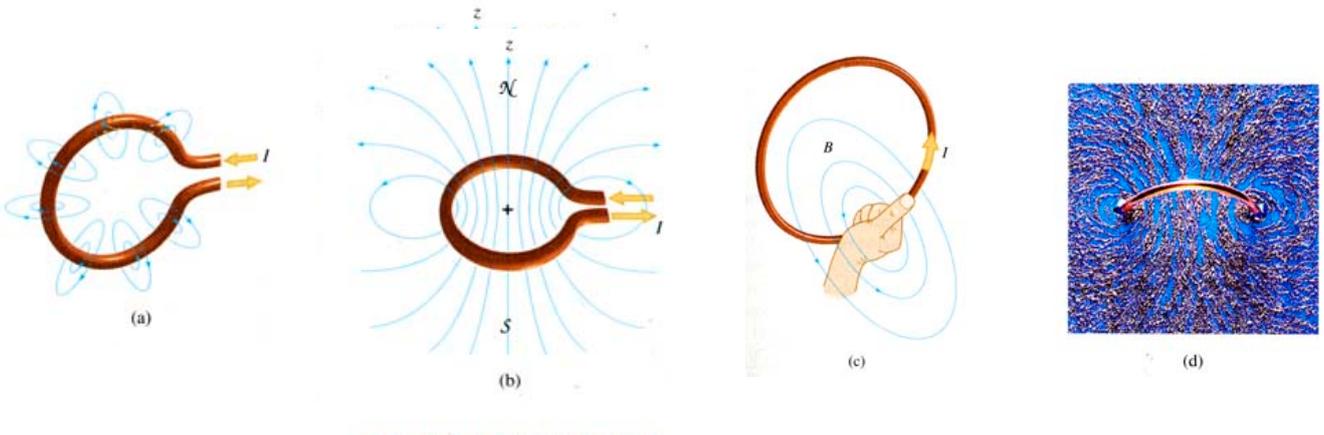
$$B = 2 \cdot 10^{-7} \frac{i}{d}$$

2) Cas d'un courant passant dans un conducteur circulaire (une spire)

Les lignes d'induction magnétique sont des cercles au voisinage des conducteurs situés dans un plan perpendiculaire à la spire .

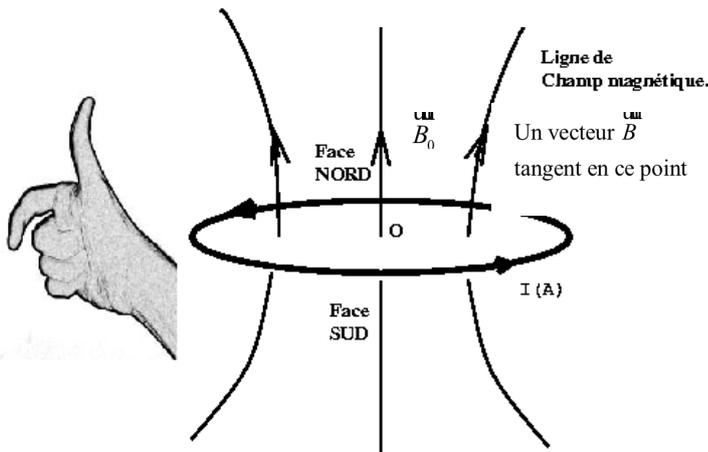
Elles se déforment pour tendre à devenir rectilignes à mesure qu'elles se rapprochent de l'axe de la spire.

Les lignes d'induction sortent par une face, appelée **face nord** et rentre par l'autre face appelée **face sud**.



a) Détermination des pôles

\vec{B}_0 : vecteur champ magnétique en O



On définit le **pôle sud** d'une spire étant la face devant laquelle il faut se placer pour « voir » le courant tourner dans le sens des aiguilles d'une montre. Dans le cas contraire, on se trouve devant le **pôle nord**.

Remarque: le sens de \vec{B} est inversé lorsque l'on inverse le sens du courant

b) Intensité du vecteur induction magnétique B au centre de la spire

On peut déduire la valeur de B d'après ce qui a été vu au cas précédent :

$$B_o = 2\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i}{R}$$

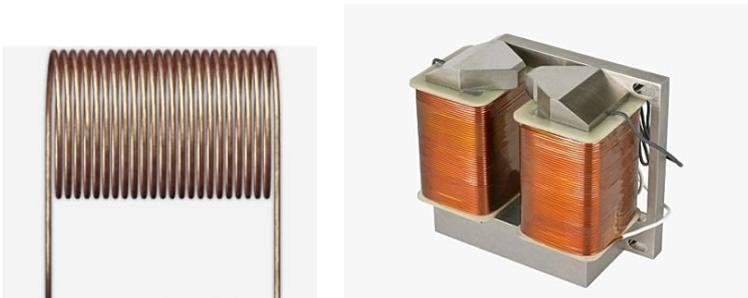
R: Rayon de la spire

Remarque : L'intensité de \vec{B} est d'autant plus grande que l'intensité du courant est importante et que le rayon de la spire est petit.

3) Spectre magnétique au voisinage d'une bobine

a) Définition

Une bobine ou solénoïde s'obtient en enroulant un fil conducteur sur un cylindre isolant de grande longueur, par rapport à son diamètre



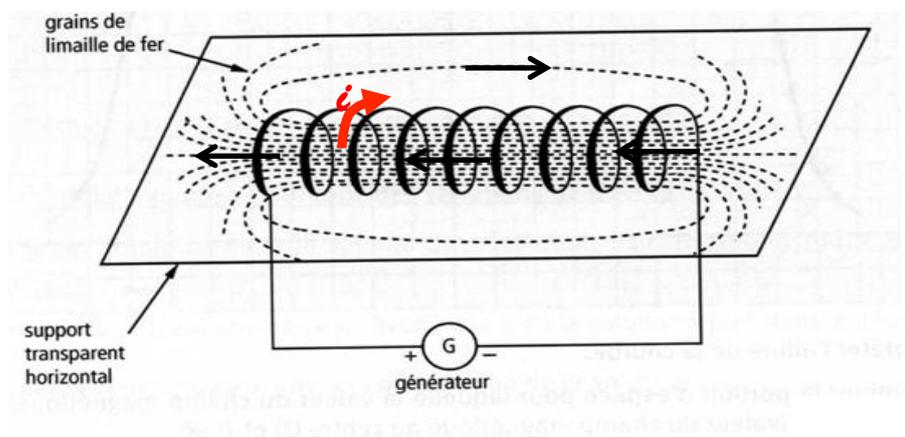
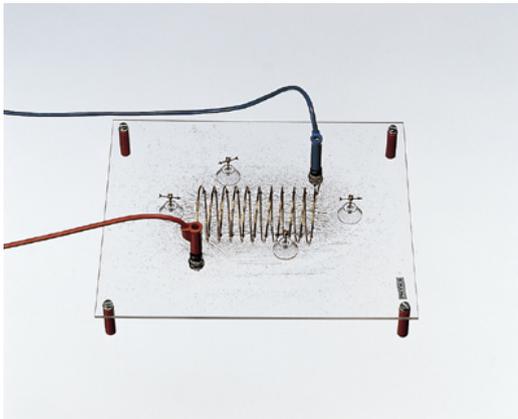
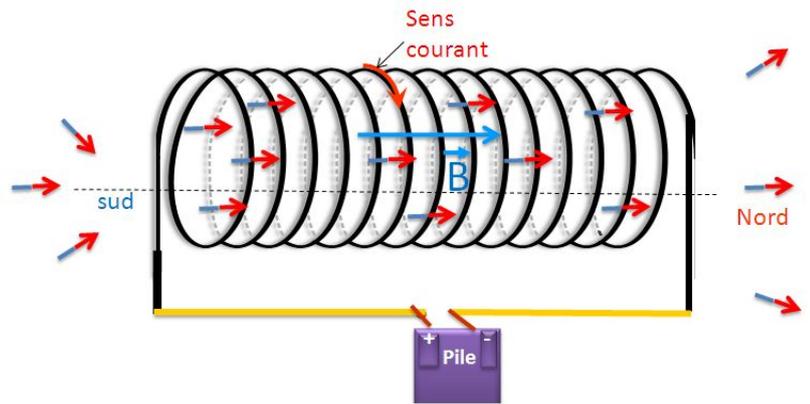
b) Spectre magnétique

On place des aiguilles aimantées ou on saupoudre de limaille de fer.

On fait passer un courant continu dans la bobine

Chacune des aiguilles aimantées se stabilise

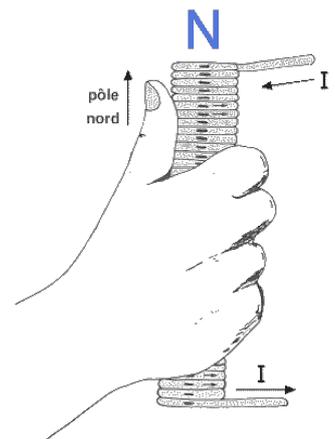
Les grains de limaille de fer se placent selon des lignes permettant de distinguer un **spectre intérieur** et un **spectre extérieur**



Dans la partie centrale de la bobine le spectre intérieur est celui d'un champ magnétique uniforme. Le spectre extérieur d'une bobine est semblable à celui d'un barreau aimanté.

Remarques:

- si on inverse le courant les aiguilles aimantées se stabilisent dans le sens inverse
- Le sens du champ magnétique peut être retrouvé par la **règle du pouce droit**
- Selon le sens du champ magnétique on définit le pôle Nord et le pôle Sud de la bobine qui devient un électroaimant.



c) Intensité du vecteur induction magnétique au centre de la bobine

$$B_o = \mu \frac{N}{l} i$$

N : nombre de spires de la bobine
 l : longueur de la bobine (m)
 i : intensité du courant (A)
 μ : perméabilité magnétique du milieu (Tm/A)

Remarque:

- μ dépend du milieu remplissant l'intérieur de la bobine. Dans le vide on le note μ_0 et vaut $4\pi 10^{-7} \text{ Tm/A}$
- On peut obtenir une même valeur pour l'induction magnétique, B, en jouant soit sur l'intensité i , soit sur le nombre totale de spires, N. (5 spires avec 100A ou 2000 spires avec 0,25A)

d) Introduction d'un noyau de fer dans une bobine

Le fer est un matériau magnétique. Des particules magnétiques sont présentes à l'intérieur du fer. Dans le fer doux, ces particules s'alignent sur un champ magnétique externe. De cette façon, le noyau de fer doux agit comme un aimant à part entière. Une fois que le champ externe aura été éliminé, le noyau retrouvera son état normal.

Imaginons maintenant que nous insérons une pièce en fer doux au centre d'une bobine de fils de cuivre. Lors de la mise sous tension, la bobine devient un électroaimant. En outre, le noyau de fer doux se transforme lui aussi en aimant. Sa puissance viendra dès lors s'ajouter à celle de l'électroaimant.

L'effet du noyau de fer doux est nettement supérieur au doublement de l'intensité du courant ou du nombre de spires.

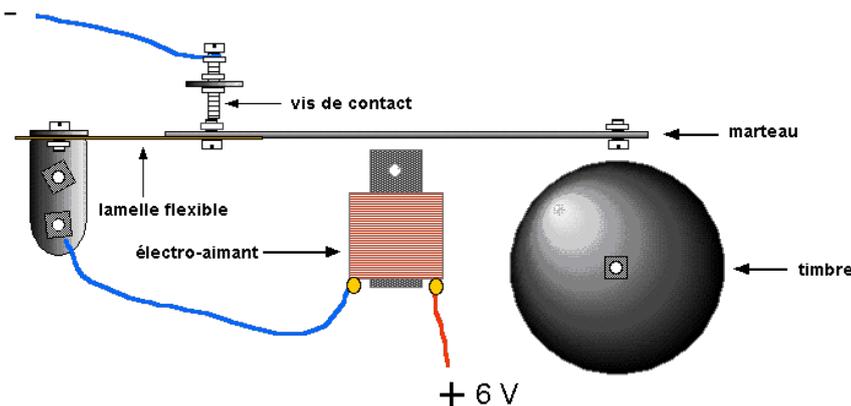
**III- L'utilisation des électroaimants**

Une bobine devient un électroaimant dès qu'un courant le traverse.

Un électroaimant est un aimant qui fonctionne à l'électricité. Il peut être activé et désactivé.

Les électroaimants permettent de nombreux usages. En voici quelques exemples.

- Une sonnette électrique – Les électroaimants font vibrer le marteau selon un mouvement de va-et-vient qui déclenche la sonnerie du carillon.

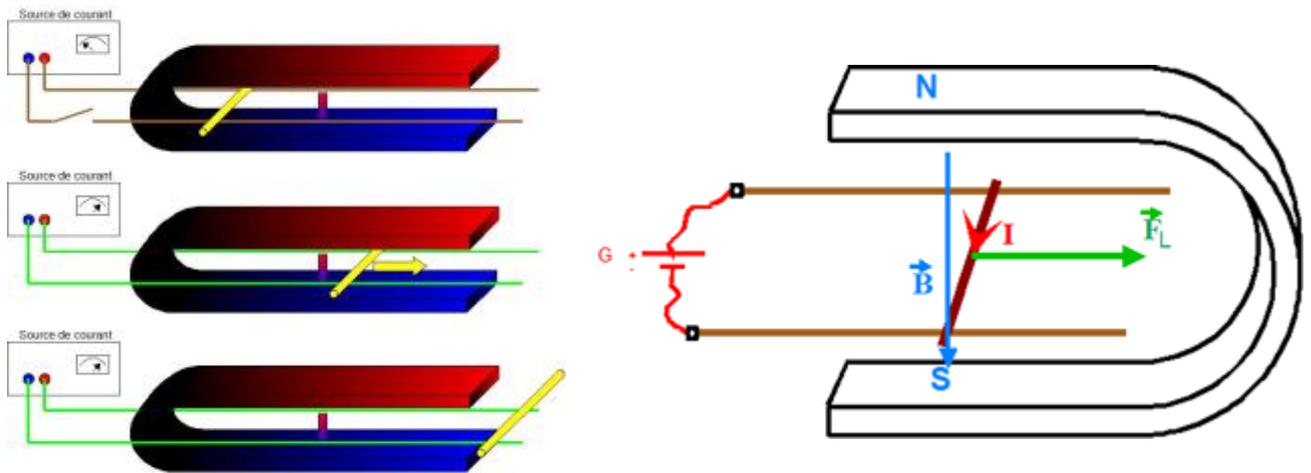


La sonnerie est constituée d'un timbre, d'une bande à trous en acier montée sur une lamelle flexible et d'un électro-aimant. Celui-ci attire la bande à trous qui s'abaisse et vient heurter le timbre. A ce moment, la bande ne touche plus la vis de contact qui transmettait le courant vers le bobinage de l'électro-aimant. Le courant ne passe plus, l'aimantation cesse, la bande remonte. Puis le cycle recommence.

- Une serrure électrique – Après avoir répondu à l'interphone, vous pouvez déverrouiller la porte depuis l'étage. Un électroaimant ouvre le verrou de la serrure. En désactivant l'électroaimant, le verrou se remet en place
- Une grue – Une grue de ferrailleur peut soulever une voiture entière. Après l'avoir amenée en position, on coupe l'électroaimant pour déposer la carcasse.
- Un instrument chirurgical – Un chirurgien ophtalmologue peut enlever des éclats d'acier de l'œil de son patient à l'aide d'un électroaimant. Il augmente l'intensité jusqu'à ce que l'électroaimant exerce une attraction tout juste suffisante pour enlever délicatement le métal.

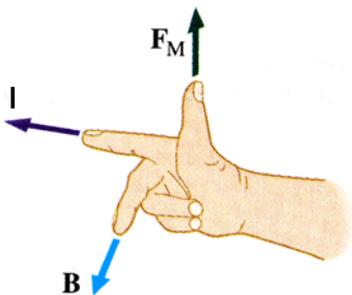
IV- La force électromagnétique

1) Mise en évidence de la force électromagnétique



Tout conducteur parcouru par un courant et plongé dans un champ magnétique reçoit une force électromagnétique, la force de Laplace, proportionnelle à l'intensité du courant et du champ magnétique.

Laplace est un physicien mathématicien français (1749 - 1827)



La force est placée dans un plan perpendiculaire aux plans contenant le conducteur et \vec{B} : on obtient sa direction à l'aide de la règle de la main droite.

Règle de la main droite : on place le pouce, l'index et le majeur perpendiculairement les uns aux autres. Si on place l'index dans la direction du courant électrique, le majeur dans la direction du champ magnétique, alors le pouce indique la direction de la force de Laplace.

Intensité de la force électromagnétique: $F = B.i.L.\sin \alpha$

La force exercée sur un conducteur de longueur L parcouru par un courant i et soumis à l'action d'un champ \vec{B} faisant un angle α avec le conducteur.

Cette force est dirigée perpendiculairement au plan défini par les directions du champ et du conducteur

Elle a un sens qui suit la règle des trois doigts.

2) Principe du haut-parleur

Le haut-parleur le plus largement utilisé (99%) est le haut-parleur électrodynamique. Nous allons voir son principe de fonctionnement ici.

Sa fonction dans une enceinte est d'agir comme un double transformateur d'énergie:

- 1) Premièrement il reçoit le signal audio, qui est une énergie électrique, qu'il va transformer en une énergie mécanique. En effet, certaines parties du haut-parleur (la bobine mobile) vont se mettre en mouvement lorsqu'un signal audio est reçu.
- 2) Deuxièmement il transforme cette énergie mécanique en une énergie acoustique, grâce à sa membrane. Celle-ci est reliée à la bobine mobile, et aura donc les mêmes mouvements que cette dernière. Et c'est en se déplaçant sous l'action de la bobine mobile que la membrane créera une pression acoustique, qui n'est autre chose que le son produit.

Remarque: on peut facilement observer la pression acoustique produite par la membrane des haut-parleurs puissants: en approchant sa main ou une feuille de papier du haut-parleur lorsque celui-ci émet un son fort, on peut sentir des souffles d'air provoqués par les déplacements de la membrane.

Explication du fonctionnement:

Le principe de base du fonctionnement d'un haut-parleur est régi par la loi de Laplace. Les 2 conditions indispensables de départ sont:

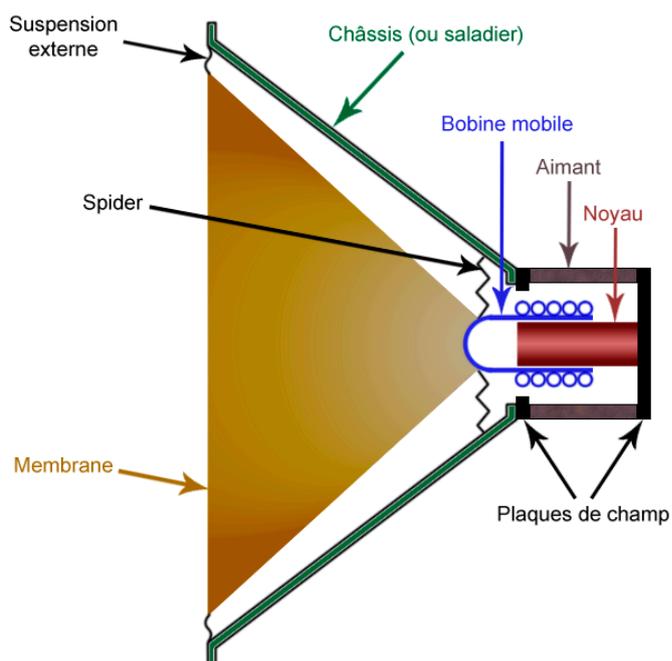
- 1) **L'aimant** crée un champ magnétique au niveau de la bobine.
- 2) La **bobine mobile** est elle-même parcourue par un courant, qui provient de l'amplificateur audio.

Avec ces 2 conditions, la loi de Laplace montre qu'une force apparaît alors au niveau de la bobine mobile, qui la fait se déplacer dans un sens ou dans l'autre en fonction du sens du courant qui la parcourt.

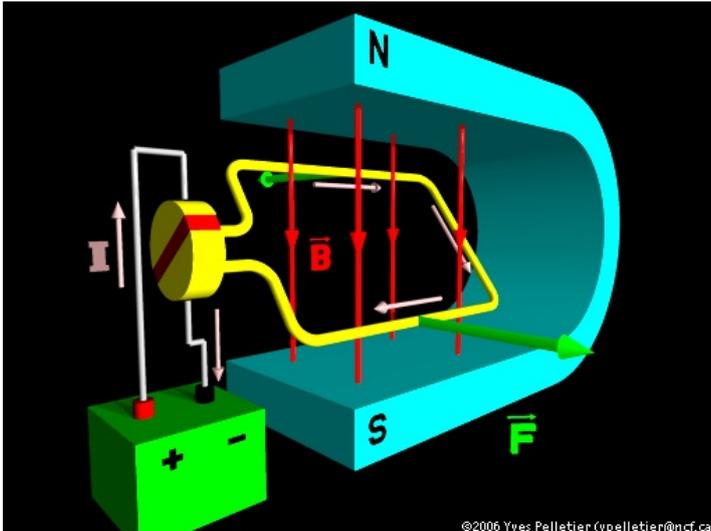
Comme la bobine mobile est reliée à la **membrane**, cette dernière suit les mouvements de la bobine. Par ses déplacements, la membrane exerce des pressions sur l'air environnant (des surpressions lorsque la bobine et la membrane se dirigent vers l'extérieur du haut-parleur, et des dépressions lorsque la bobine et la membrane rentrent vers l'intérieur).

Ce sont ces variations de pression qui produisent le son que l'on perçoit.

Le rôle du **spider** et de la **suspension extérieure** est simplement de guider le mouvement de va-et-vient de la bobine et de la membrane bien dans l'axe du haut-parleur, et que ceux-ci n'aillent pas de travers.



3) Le moteur électrique



Le moteur électrique est un dispositif électromécanique permettant de transformer l'énergie électrique en énergie mécanique. Il est composé de fils conducteurs placés à la périphérie d'un axe tournant. La façon de disposer les fils conducteurs permet de créer des forces. Ces dernières constitueront le couple moteur (effort de rotation appliqué à un axe par deux forces égales et opposées sur différents points de cet axe)

Les flèches indiquent le sens du courant (du plus vers le moins). Vous pouvez reconnaître les lignes du champ magnétique dirigées du pôle nord vers le pôle sud. On a représenté la force de Laplace qui est exercée sur un circuit parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique.

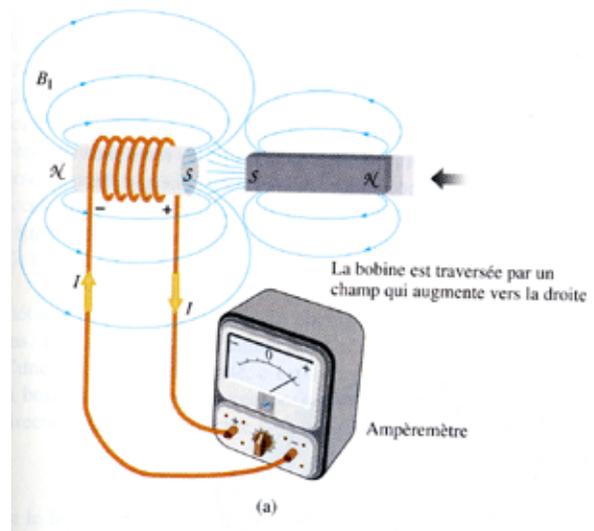
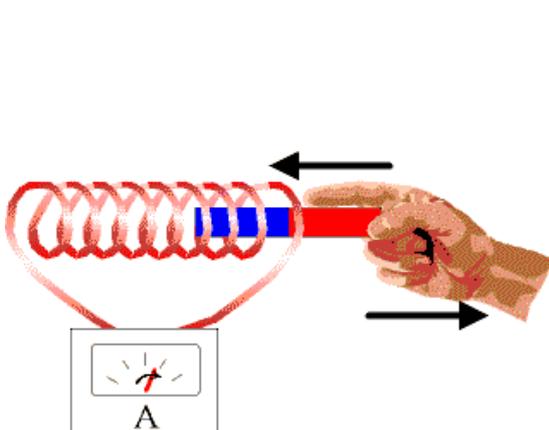
La force de Laplace est orthogonale à la direction de l'intensité du courant et à celle du champ magnétique. L'orientation de cette force résulte de l'application de la règle très connue des trois doigts (pour la main droite!)

V- Induction électromagnétique

1) La loi de Lenz

Nous avons vu précédemment qu'un courant qui passe dans un fil conducteur crée un champ magnétique. On peut alors se demander si un champ magnétique peut créer un courant dans un fil conducteur.

Si on place un aimant immobile près d'une bobine on ne voit apparaître aucun courant dans la bobine.



Par contre si on avance cet aimant vers l'intérieur de la bobine on s'aperçoit que durant le déplacement de l'aimant l'ampèremètre montre qu'un courant est créé dans la bobine. En plus si on retire l'aimant le même phénomène se produit mais le courant indiqué par l'ampèremètre est inversé.

L'inducteur est l'aimant qui crée le champ magnétique. Le courant électrique qui apparaît dans la bobine est induit.

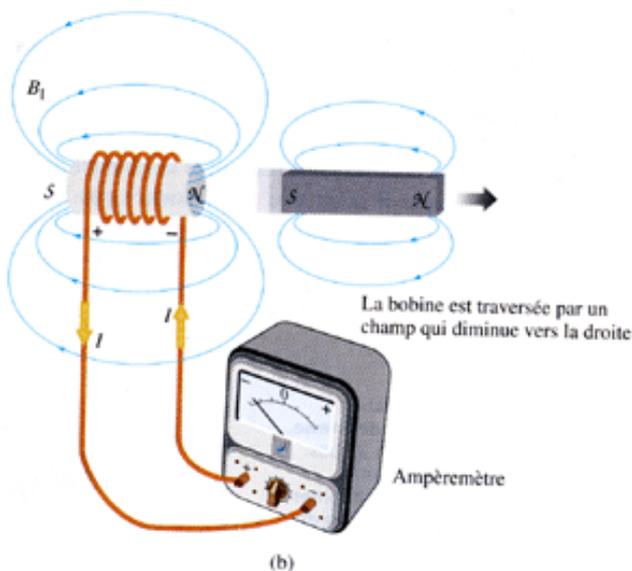
Par ses effets électromagnétiques, le courant induit s'oppose à la cause qui lui donne naissance, c'est à dire l'approche du sud de l'aimant.

Deux pôles de même nature se repoussent ; en conséquence une face sud apparaît sur la bobine, en regard du sud de l'aimant.

Le courant induit va créer un champ magnétique qui va s'opposer à la variation du champ magnétique de l'aimant (variation positive puisque le champ créé dans la bobine augmente).

La règle de la main droite donne le sens du courant induit, connaissant le sens du champ magnétique.

Si on retire maintenant cet aimant vers l'extérieur de la bobine



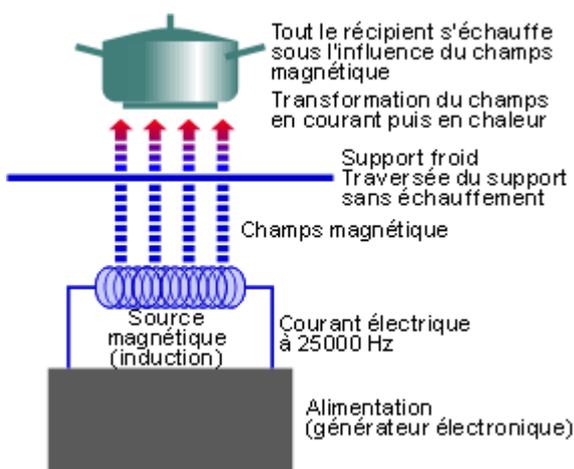
Par ses effets électromagnétiques, le courant induit s'oppose à la cause qui lui donne naissance, c'est à dire l'éloignement du sud de l'aimant.

Deux pôles de nature contraire s'attirent ; en conséquence une face nord apparaît sur la bobine, en regard du sud de l'aimant.

Le courant induit va donc créer un champ magnétique qui va compenser la variation du champ magnétique de l'aimant (variation négative puisque le champ créé dans la bobine diminue). Le courant induit sera donc inversé par rapport au cas précédent.

2) Applications et incidences

a) Les plaques chauffantes par induction



Certaines plaques chauffantes modernes, qui remplacent les plaques au gaz, fonctionnent par "induction". En fait deux effets interviennent.

Le premier effet est l'induction : sous la plaque est disposée une bobine, qui crée un champ magnétique lorsque du courant la traverse. Ce champ magnétique change très vite, et lorsqu'on approche un morceau de métal de cette bobine, il se crée dans le métal un courant électrique : c'est le phénomène d'induction. Cela ne veut pas dire que le métal se charge, et qu'il devient dangereux de le toucher, pas du tout ! Mais comme il est conducteur de l'électricité, le métal est sensible au champ magnétique.

Le gros avantage, c'est bien entendu que comme notre corps n'est pas sensible aux champs magnétiques variables, puisqu'il n'est pas conducteur de l'électricité, toucher la plaque à induction ou mettre la main au dessus ne provoque pas de brûlure !

Une dernière chose : en fait, toutes les casseroles ne sont pas adaptées aux plaques à induction. Il faut, pour que cela soit le cas, que le fond de la casserole soit fortement aimantable. Dans ce cas, l'effet du champ magnétique est renforcé (de la même manière qu'on met un matériau aimantable dans un électro-aimant pour amplifier le champ créé par une bobine, le fond aimantable renforce l'effet du champ magnétique variable) et les courants induits sont donc beaucoup plus importants. Finalement, c'est un avantage : il n'y a que les matériaux suffisamment aimantables qui soient adaptés. Ainsi, une fourchette ne devient pas immédiatement brûlante quand on l'approche d'une plaque à induction...

b) *Champ magnétique terrestre*

La magnétosphère, créée par le champ magnétique terrestre, joue un rôle essentiel dans le développement de la vie sur terre en déviant les particules cosmiques de haute énergie. Il développe une sorte de bouclier empêchant le bombardement de ces particules ionisantes qui détruiraient les chaînes ADN et réduiraient à néant tout espoir d'évolution biologique.

Dans les périodes de forte activité solaire, on assiste à une augmentation brutale du rayonnement UV et X en provenance du soleil, ainsi que de la vitesse du vent solaire.

Des particules (plasma) pénètrent alors dans la cavité formée par le champ magnétique terrestre (appelée magnétosphère) donnant lieu à des phénomènes spectaculaires : les orages magnétiques et **les aurores boréales**.



Ces phénomènes s'accompagnent souvent :

- de perturbations des systèmes de télécommunication (câbles sous marins, ondes radio, GPS)
- d'une augmentation des radiations reçues par les passagers des avions de ligne et les astronautes
- de courants induits dans les pipelines (accélérant leur usure)
- de courants parasites dans les réseaux électriques
- d'avaries satellitaires

c) *Incidences des rayonnements électromagnétiques sur la santé*

Les champs magnétiques de basses fréquences induisent une circulation de courant dans le corps humain. L'intensité de ces courants dépend de l'intensité du champ magnétique extérieur. S'il est suffisamment puissant, ces courants peuvent stimuler les nerfs et les muscles ou affecter les processus biologiques jusqu'au niveau intracellulaire.

La réglementation professionnelle concernant les champs électromagnétiques repose sur la directive européenne 2004/40/CE. Elle fixe les prescriptions minimales en matière de protection des travailleurs exposés à ces champs, qu'ils soient liés ou non à leur activité propre. Elle définit également les valeurs limites maximales de champs électromagnétiques qu'il ne faut pas dépasser en milieu professionnel dans l'Union européenne.