

Electromagnétisme

Les champs magnétiques

Les sources de champs magnétiques existent à l'état naturel (Terre, aimant naturel) ou peuvent être créées artificiellement (aimant, électro-aimant).

L'unité du champ magnétique $\vec{B}$ est le Tesla (T)
Le champ magnétique se mesure avec un teslamètre.

Schéma d'un aimant :
noir

 ou
bleu


Bipolarité

Un champ magnétique possède toujours un pôle nord et un pôle sud. Ils sont indissociables.

Si on casse un aimant ...



... on obtient deux aimants.

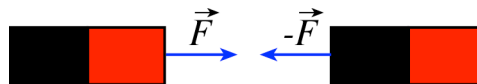


Action d'un champ magnétique sur un aimant : attraction - répulsion

Si on approche deux pôles de même polarité, les aimants se repoussent.



Si on approche deux pôles opposés, les aimants s'attirent.

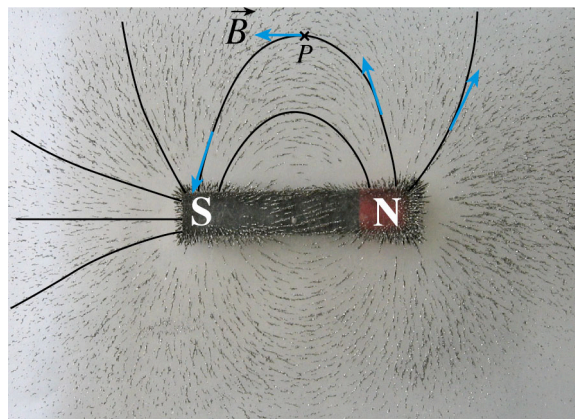


Les forces dépendent de l'intensité du champ magnétique et de la distance entre les deux aimants.

Visualisation du champ magnétique

Des grains de limaille de fer, saupoudrés autour d'un aimant, vont s'orienter selon les lignes de champ.

- Les lignes de champs montrent l'orientation du champ magnétique.
- La densité de lignes de champ informe sur l'intensité du champ magnétique.
- La figure formée par la limaille de fer s'appelle un spectre magnétique.



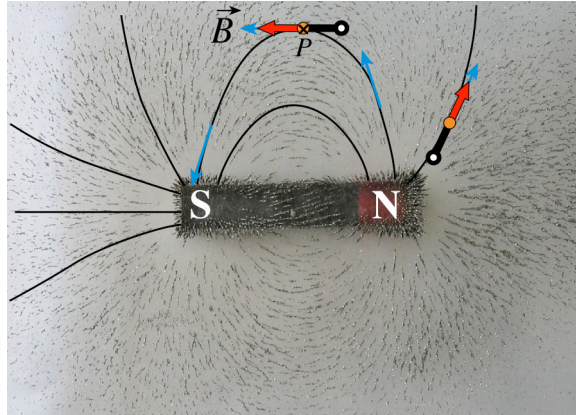
Spectre d'un aimant droit

+ symbolisation de quelques lignes de champs et quelques vecteurs « champ magnétique ».

Le champ magnétique $\vec{B}$ est une grandeur vectorielle.
Il varie en direction et en intensité selon l'endroit considéré.

Observations

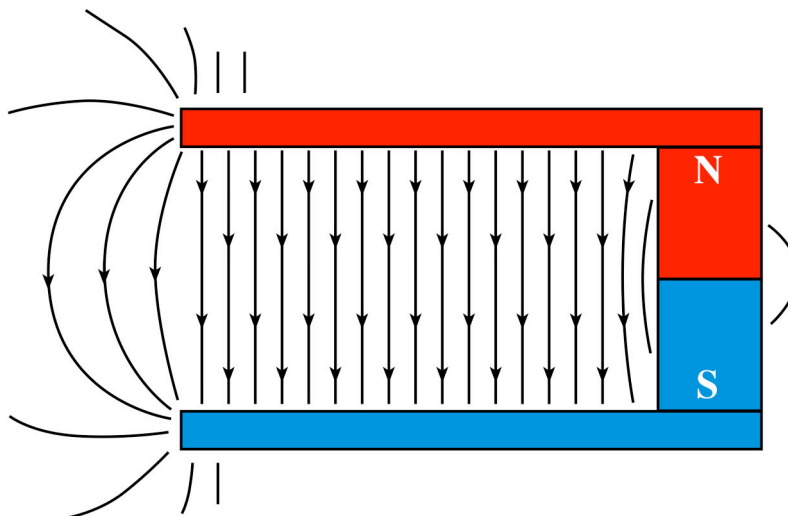
- Les lignes de champ vont du pôle nord vers le pôle sud.
- Le champ $\vec{B}$ est tangent aux lignes de champs.
- Si on place une boussole au point P, son pôle nord va s'orienter dans la direction de $\vec{B}$.



Les boussoles s'orientent selon les lignes de champ.

Internet

- simulation du spectre d'un aimant droit
http://www.walter-fendt.de/ph11f/mfbar_f.htm



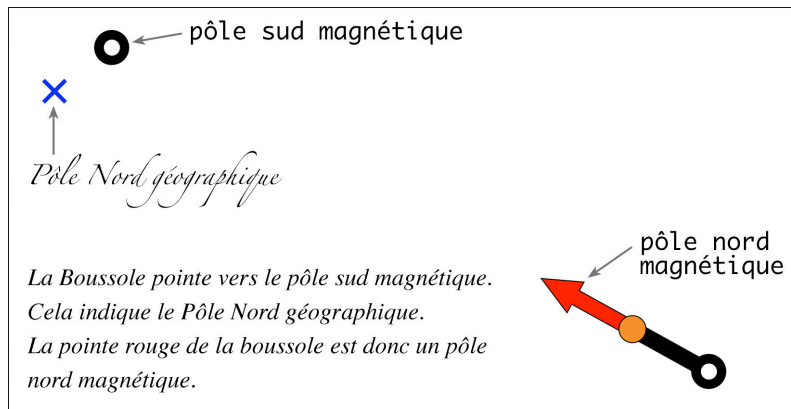
*Ligne de champ entre les armatures d'un aimant en U.
(toutes les lignes de champ extérieures ne sont pas dessinées)*

Observation

- A l'intérieur d'un aimant en U le champ magnétique est constant en intensité et en direction. On dit qu'il est uniforme.

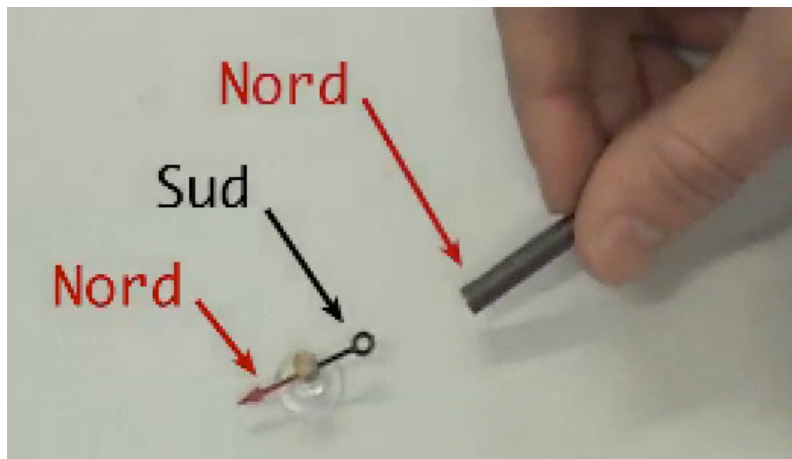
Comment déterminer le pôle d'un aimant

Il faut au préalable connaître la polarité d'un aimant.
Par exemple celui de la Terre (voir l'image ci-dessous)



Le pôle géographique et le pôle magnétique sont décalés de 11° par rapport au centre de la Terre.

Ensuite il suffit de constater la répulsion ou l'attraction entre l'aimant dont on veut déterminer les pôles et l'aimant dont on connaît la polarité.



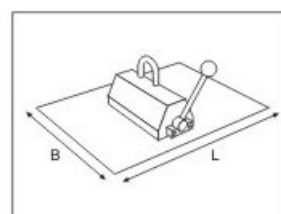
Le barreau aimanté présente un pôle nord à la boussole

Boussole

Attention, une boussole se désaimante et s'aimante en inverse facilement.

Utilisation industrielle

- Moteurs à aimants permanents
- Manutention



Crochet de manutention à aimant permanent

L'aimant est à l'intérieur de la boîte jaune.

La poignée permet d'approcher l'aimant près de l'objet (composé de fer) à manipuler.

Le crochet permet la manipulation avec un engin de levage (treuil par exemple)

Champ magnétique crée par un courant

La source microscopique d'un champ magnétique est le déplacement de charges électriques. Un courant électrique étant un déplacement de charges électrique va donc générer un champ magnétique. Cette propriété est utilisée dans de nombreux systèmes électrotechniques :

- électro-aimants (gachette de porte d'entrée, engin de levage de ferraille)



Sous l'effet du courant, l'axe de l'électroaimant se rétracte.

Source inconnue sur Internet



Electroaimant pour diverses applications industrielles.

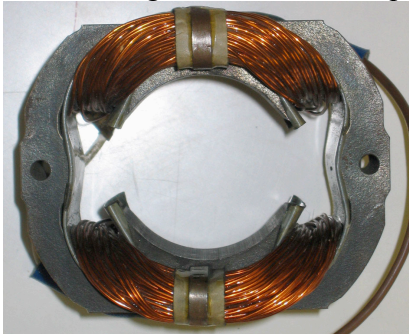
Source inconnue sur Internet



Levage de boîtes de conserves

Source inconnue sur Internet

- moteurs et générateurs électriques



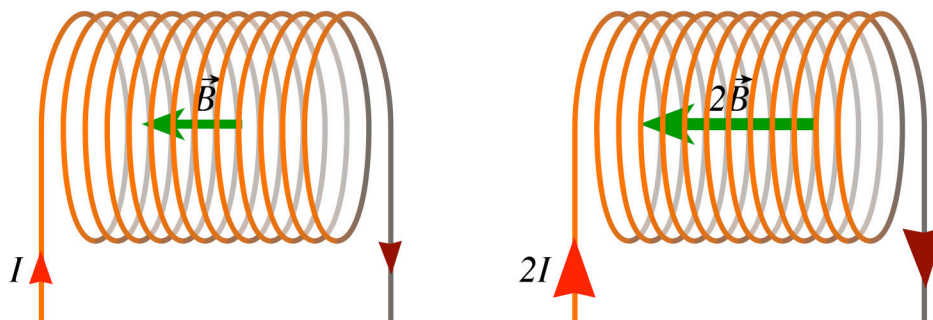
Stator d'un moteur bipolaire

- train à sustentation magnétique



Maglev - <http://maglev.de/>

L'intensité du champ magnétique est proportionnelle au courant qui le crée : $B = k \times I$



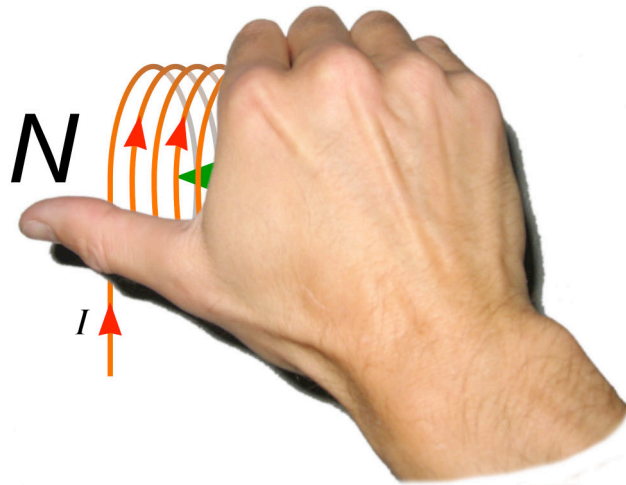
Si le courant double, le champ double.

Observation

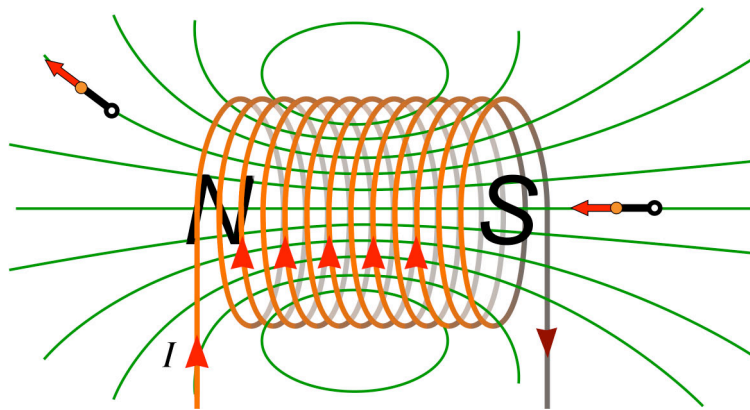
- Dans la grande majorité des applications magnétiques du courant, le fil électrique sera enroulé en bobine. Cela permet d'augmenter les propriétés magnétiques du courant en variant le nombre de spires et en plaçant au centre de la bobine un noyau ferromagnétique.

Polarité d'une bobine parcourue par un courant – règle de la main droite

Placer votre main droite sur la bobine pour l'entourer dans le sens de circulation du courant. Votre pouce vous indiquera la face Nord de la bobine.

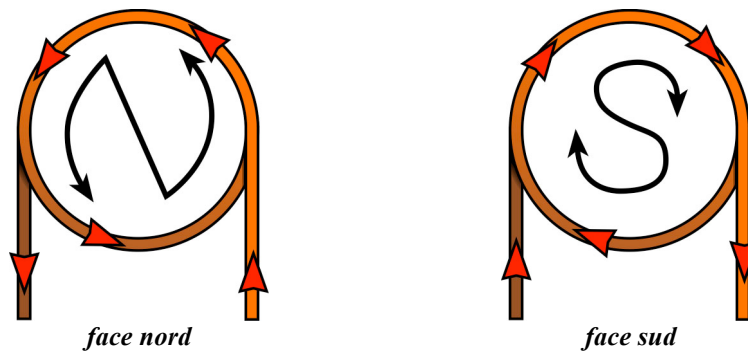


La règle de la main droite indique le pôle nord de la bobine.



Lignes de champ d'un solénoïde

Une autre façon pour déterminer les pôles d'une bobine est de la placer selon son axe et d'observer le sens de rotation du courant.



Champ magnétique au milieu d'un solénoïde.

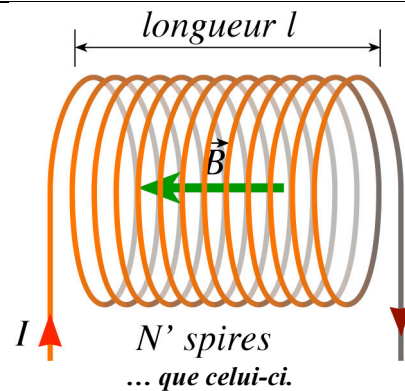
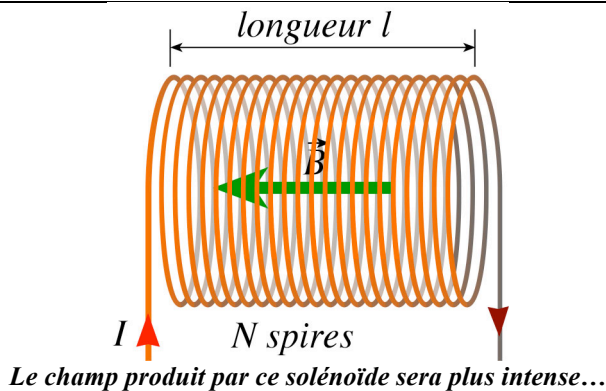
Un solénoïde est une bobine qui possède une longueur l et une répartition uniforme de N spires.
Nous avons vérifié expérimentalement que le champ magnétique s'exprimait de la façon suivante

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I$$

l en mètres (m) ; I en ampères (A) ; N nombre de spires

μ_0 est la perméabilité du vide (ou de l'air) :

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ u.s.i.} = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ u.s.i.}$$



Excitation magnétique

Reprenons la formule $B = \mu_0 \frac{N}{l} I$

Les termes N , l et I dépendent de la source de champ magnétique (la bobine).

Le terme μ_0 dépend du milieu qui se trouve au centre de la bobine (l'air).

On définit l'excitation magnétique $\vec{H}$ qui ne dépend que de la source.

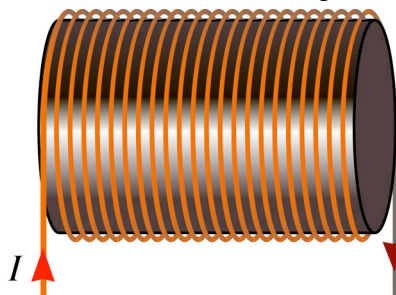
Pour le solénoïde l'intensité H (le module du vecteur) va s'exprimer :

$$H = \frac{N}{l} I$$

H s'exprime en ampères par mètre ($A \cdot m^{-1}$).

Milieu ferromagnétique

Si l'on place un noyau ferromagnétique (alliage à base de fer) dans la bobine, le champ sera plus intense. Cette propriété est utilisée dans les moteurs électriques et les transformateurs.

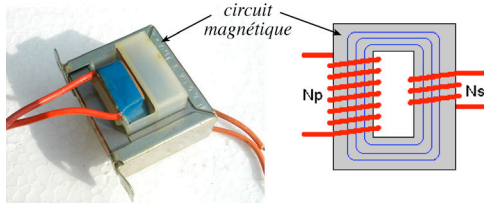


$$B = \mu \times H = \mu \frac{N}{l} I$$

μ est la perméabilité du matériau. μ est beaucoup plus grand que μ_0 .

Application du ferromagnétisme

- transformateur : il transforme une tension sinusoïdale de tension efficace U_1 en une autre tension de valeur efficace U_2 plus grande ou plus petite que U_1 . Le circuit magnétique canalise et intensifie le champ magnétique.



Sources inconnues sur Internet

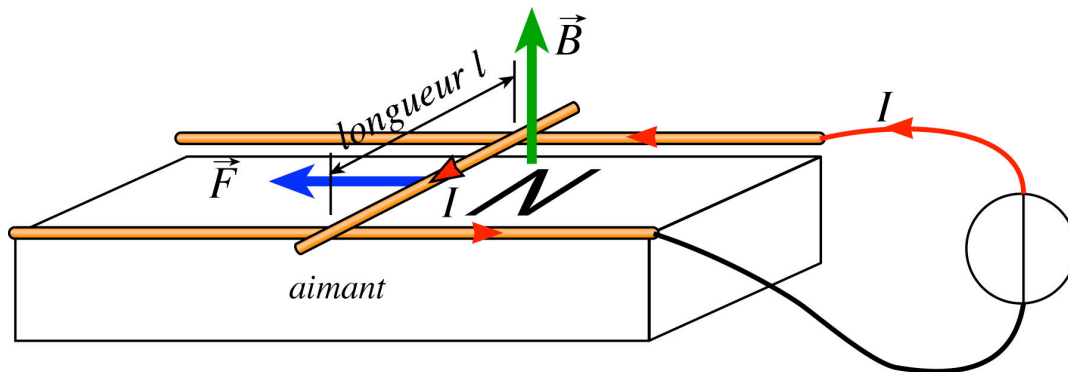
- Moteurs et générateurs électriques : tout le bâti en fer du moteur contribue au transfert d'énergie électromagnétique entre le rotor et le stator.



Source inconnue sur Internet

Force de Laplace

Vous avez pu constater que deux aimants peuvent s'attirer ou se repousser. Il existe donc une force magnétique. La force de Laplace est une des expressions de cette force.



Expérience de Laplace : le barreau conducteur se déplace sur les deux rails. ([vidéo](#))

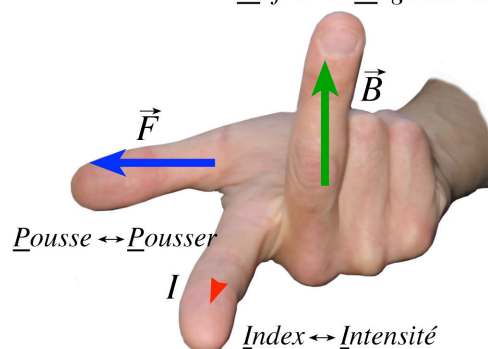
Un conducteur de longueur l , placé dans un champ magnétique $\vec{B}$ et parcouru par un courant I , subit une force appelée force de Laplace.

$$F = I \times l \times B$$

F en newtons (N), I en ampères (A), l en mètre (m), B en tesla (T).

L'orientation de la force peut-être déduite par la règle des trois doigts de la main droite.

Majeur ↔ Magnétisme

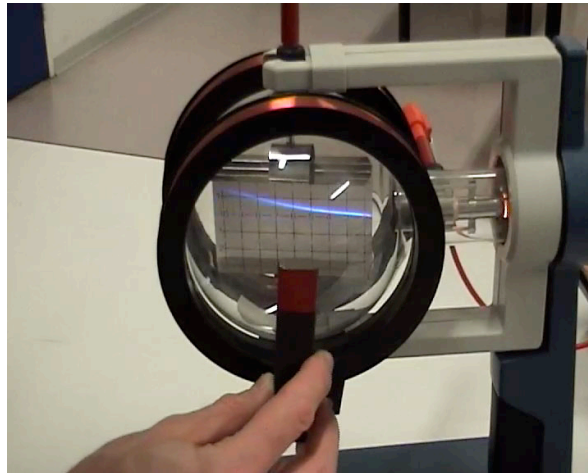


Pousse ↔ Pousser

Index ↔ Intensité

Règle de la main droite : dans l'ordre F, I, B équivalent à pousse, index, majeur.

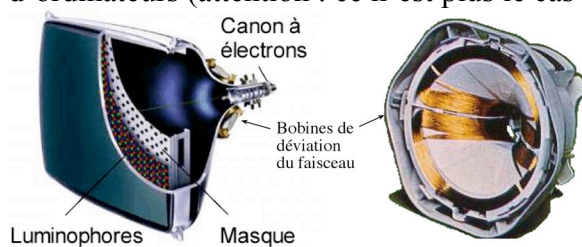
Tout comme un repère orthonormé (x,y,z), les trois doigts forment un trièdre tri-rectangle direct.
Un faisceau d'électrons étant un courant électrique dans le vide, subit également une force de déviation en présence d'un champ magnétique.



Déviation d'un faisceau d'électron.

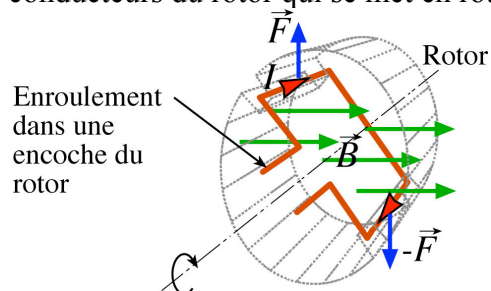
Application de la force de Laplace

- Téléviseur : c'est le principe utilisé dans les tubes cathodiques des téléviseurs et des écrans d'ordinateurs (attention : ce n'est plus le cas dans les écrans plats).

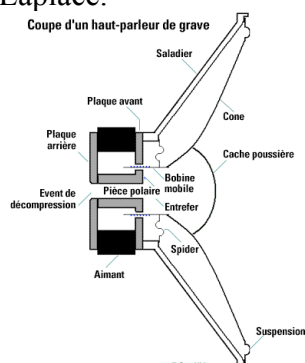


Source inconnue sur Internet

- Moteur électrique : le champ magnétique du stator applique des forces de Laplace sur les conducteurs du rotor qui se met en rotation.



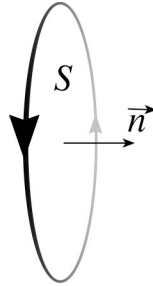
- Haut-parleur
Le signal électrique fait vibrer la membrane du haut-parleur sur le principe de la force de Laplace.



Source www.son-video.com

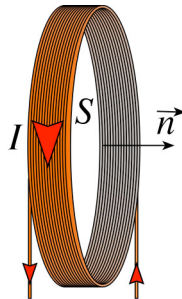
Vecteur surface

Soit une surface S délimitée par un cercle ; on choisit un sens de parcours sur le cercle et on définit le vecteur $\vec{n}$ unitaire normale à la surface avec la règle de la main droite (voir un paragraphe précédent).



On peut également définir le vecteur $\vec{S} = S\vec{n}$

Pour une bobine parcourue par un courant, le sens de parcours sera donné par le sens du courant. Et donc $\vec{n}$ est orienté comme le champ magnétique généré par la bobine ($\vec{n}$ pointe vers la face nord de la bobine).



Représentation d'un vecteur perpendiculaire au plan de la feuille



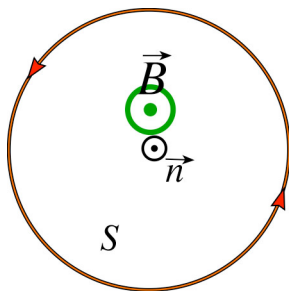
Ce symbole est celui d'un vecteur qui pointe vers vous.



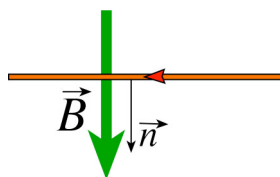
Ce symbole est celui d'un vecteur qui s'éloigne de vous.

Flux magnétique

Le flux magnétique représente la quantité de champ magnétique « vu » à travers les spires d'un enroulement (une bobine). Le flux change selon l'orientation de la bobine par rapport au champ magnétique.



Une spire traversée par un champ magnétique (vue de face).

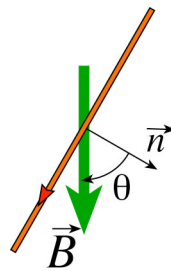
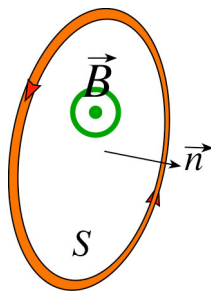


Vu d'au-dessus, l'angle entre la normale à la surface et le champ est nul.

L'angle $\theta = (\vec{B}, \vec{n})$ est nul.

$$\cos \theta = 1$$

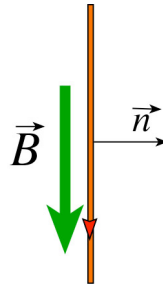
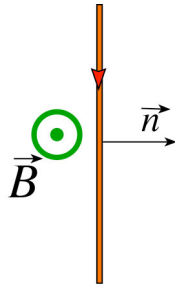
Le flux est maximum



La surface « vue » par le champ magnétique dépend de l'angle θ .

$$S_{\text{vue}} = S \times \cos \theta$$

Vu d'au-dessus, la normale à la surface et le champ s'écartent d'un angle θ (thétha)



L'angle $\theta = (\vec{B} \ \vec{n})$ fait 90° .

$$\cos \theta = 0$$

Le flux est nul.

Le champ magnétique ne traverse pas la spire

Le flux magnétique Φ à travers un circuit est le produit du champ magnétique par la surface apparente que lui présente le circuit.

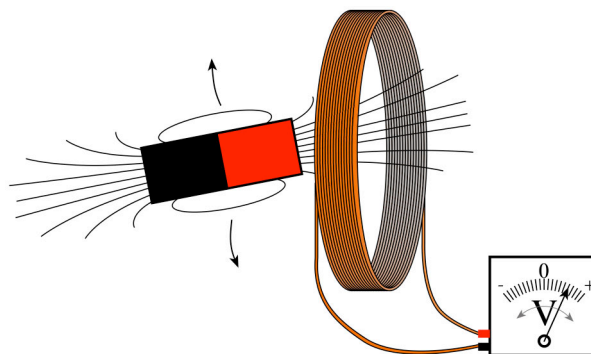
$$\Phi = B \times S \times \cos \theta$$

L'unité du flux est le Weber (Wb).

θ (thétha) est l'angle entre la normale $\vec{n}$ à la surface et la champ magnétique $\vec{B}$.

Force électromotrice (fém ou f.é.m.)

Expérience : si on remue un aimant devant une bobine, non alimentée, on observe une tension à ses bornes.



Création d'une force électromotrice

Le champ magnétique applique une force sur les électrons de la bobine. Cette force induit une tension électrique appelée force électromotrice.

Dans quel cas observe-t-on une force électromotrice ?

- l'aimant bouge devant la bobine
- la bobine bouge devant l'aimant
- ...

Dans quel cas la f.é.m. est nulle ?

- l'aimant est immobile par rapport à la bobine.

Plusieurs expériences permettent (voir sur www.physique-appliquee.net) de comprendre que pour observer une f.é.m. aux bornes de la bobine, il faut une variation de flux. D'où la loi de Faraday.

Loi de Faraday

Tout circuit soumis à une variation de flux, voit apparaître à ses bornes une force électromotrice (tension) e telle que :

$$fem (V) \longrightarrow e = - \frac{d\Phi}{dt} \longleftarrow \begin{array}{l} \text{variation du flux } \Phi \\ \text{en fonction du temps } t \end{array}$$

Règle du flux maximum

Les interactions entre deux sources de champ magnétique sont telles que le flux devient maximum.

Exemple

- Cette règle permet d'expliquer la rotation des moteurs électriques comme le moteur à courant continu et le moteur pas à pas.

Induction électromagnétique et courant induit

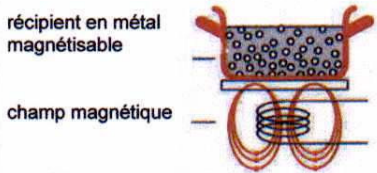
La bobine, soumise à une variation de flux, devient donc une source de tension électrique (f.é.m.).

Si on ferme le circuit de la bobine, un courant va s'établir. Comme il s'agit d'un courant induit par un champ magnétique, on parle de courant induit et d'induction électromagnétique.

Un champ magnétique, variable, induit un courant.

Exemples

- **Les alternateurs** des centrales électriques utilisent ce principe pour produire la tension et le courant du réseau EDF. Sans la rotation de la machine, il n'y aurait pas variation de flux et donc pas de f.é.m.
- **Le transformateur** utilise ce principe pour transférer l'énergie de la bobine primaire à la bobine secondaire. Pour qu'il y ait variation de flux, la bobine primaire du transformateur doit être alimentée en courant variable (sinusoïdal). En courant continu, le champ serait constant et la fem au secondaire nulle.
- **Frein à courant de Foucault** (voir plus loin).
- **Four à induction industriel**
Un fort champ magnétique induit des courants dans le métal à fondre. Ce courant induit provoque des pertes par effet joule qui fait fondre le métal.
Le lycée du Haut-Barr dispose depuis peu d'un four à induction dans son atelier de prototypage rapide.
- **Plaque à induction.**
Une plaque à induction produit un champ magnétique sinusoïdal à 5 kHz. Ce champ induit des courants dans la casserole (surtout le fond). Le fond de la casserole doit être suffisamment résistif pour que le courant induit génère de la chaleur par effet joule ($R.I^2$) qui chauffe le contenu.

 récepteur en métal magnétisable champ magnétique	
<i>Principe</i> source : membres.lycos.fr/seftech/	<i>Plaque à induction ouverte, on voit bien la bobine inductrice.</i>

Auto-induction

Mettons une bobine sous tension.

1. Le courant génère un champ magnétique croissant.
2. Le champ magnétique croissant génère un flux magnétique croissant à travers la bobine elle-même (d'où le nom d'auto-induction).
3. Une f.é.m. et un courant induit apparaissent dans la bobine. Ils sont négatifs.
4. Le courant induit étant négatif, le champ magnétique induit s'oppose au champ magnétique inducteur (point 1). Ce principe est énoncé par la loi de Lenz.
5. Le champ résultant est la somme des champs inducteur et induit.
6. Le courant résultant est la somme des courants inducteur et induit.

Exemple

- La propriété principale des bobines (ou inductances, ou selfs) est basée sur l'auto-induction



Bobine avec son noyau. Source e.m.c.2.free.fr/

Loi de Lenz

Le sens du courant induit est tel que les effets qu'il produit s'opposent à la cause qui lui donne naissance.

Exemples

- **Frein à courant de Foucault**

Lorsque le chauffeur de camion appuie sur la pédale de frein, il alimente en courant les bobines des électroaimants. Le flux variable résultant, traverse le disque dans lequel apparaît des courants induits appelés courants de Foucault. Ces courants génèrent des forces qui s'opposent à la rotation du disque et freinent le camion.

	<i>Frein à courant de Foucault modèle 2 WB 43</i>	
<i>Principe du frein à courant de Foucault</i>	<i>Frein à courant de Foucault pour machines tournantes. Source www.magtrol.com</i>	<i>Les vélos de salon possèdent un frein à courant de Foucault. Source www.manor.ch</i>

- **Freinage du TGV**

Le freinage de la rame est assuré par 4 modes de freinage

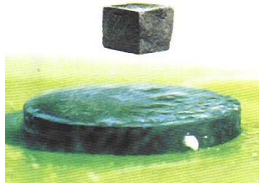
- * rhéostatique,
- * à courants de Foucault (rotatif),
- * oléopneumatique à sabots, utilisé pour les freinages d'appoint et d'arrêt,

* magnétique, utilisé pour les freinages d'urgence seulement.

<http://www.emdx.org/rail/30ansTGV/>

- **Céramique supra-conductrice**

L'aimant tient en suspension au-dessus de la céramique du fait de l'apparition d'un courant induit qui provoque un champ magnétique qui s'oppose à l'aimant.



Source http://perso.wanadoo.fr/pignolos/college/3e_en+supraconducteurs.htm

Inductance propre d'un circuit

Nous avons déjà parlé précédemment du phénomène d'auto-induction.

Donc toute bobine est soumise à son auto-induction. C'est inévitable. On définit alors l'inductance propre (ou simplement inductance) du composant.

En combinant les différentes relations : $e = -\frac{d\Phi}{dt}$; $\Phi = B \times S$ et $B = \mu \frac{N}{l} I$,

on peut en déduire une relation donnant la tension u_L aux bornes de la bobine en fonction du courant i qui la traverse (en convention récepteur).

$$u_L = L \cdot \frac{di}{dt}$$

où L , appelée inductance de la bobine, englobe les termes constants, μ , N , l , S des équations précédentes.

L se mesure en henry (H) – exemple : $L=100$ mH, u_L en volts (V), i en ampère (A), t en secondes (s)

Energie emmagasinée dans une bobine

Lorsqu'une bobine est mise sous tension, elle emmagasine une certaine quantité d'énergie sous forme magnétique. Cette énergie s'exprime.

$$W = \frac{1}{2} L I^2$$

I en ampère (A), L en henry (H), W en joules (J)

Plusieurs vidéos illustrant ce cours sont consultables en ligne à l'adresse :

<http://www.physique-appliquee.net/videos/index.php>