

# ELECTROMAGNÉTISME

## EM1 Magnétisme et champ magnétique

### 1 Propriétés des aimants

Aimant=corps capable de désorienter une boussole, d'attirer du fer, de repousser ou d'attirer un autre aimant.

Pôles = régions où le magnétisme est le plus intense.

La Terre est un gigantesque aimant

pôle nord (rouge) = pôle qui s'oriente vers le Nord géographique

pôle sud (vert) = pôle qui s'oriente vers le Sud géographique

2 pôles de même nature se repoussent. 2 pôles de nature différente s'attirent

Le pôle Nord géographique est un pôle sud magnétique et vice-versa.

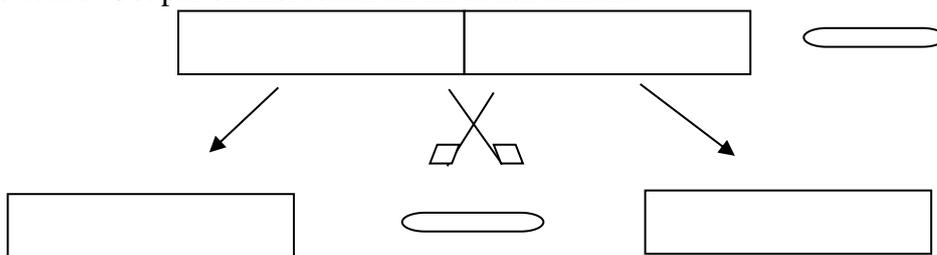
[Film anglais \(india\) pour introduire les bases du magnétisme \(long\)](#)

[Film anglais pour introduire l'origine du magnétisme](#)

On obtient un nouvel aimant si on influence un corps ferromagnétique (fer, acier (Fe+1% carbone), nickel, cobalt) à l'aide d'un aimant permanent. L'alliage acier inoxydable (avec Cr) n'est pas ferromagnétique.

Il est impossible d'isoler un seul pôle d'un aimant.

Expérience: Couper en morceaux un fil de fer aimanté



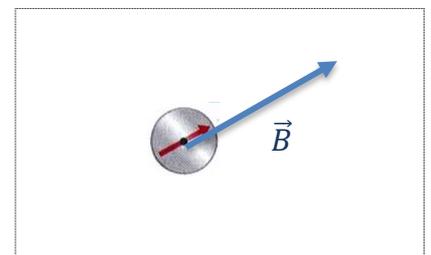
### 2 Vecteur champ magnétique

#### Définition

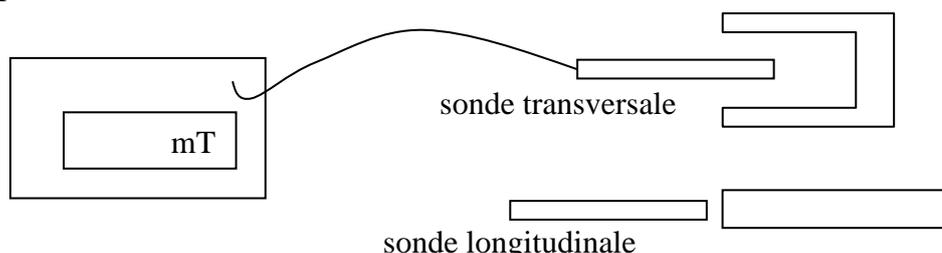
Il règne un champ magnétique en un point P de l'espace, si une petite aiguille aimantée mobile, placée en ce point, y prend une direction déterminée.

Le vecteur champ magnétique  $\vec{B}$  en un point P est défini par:

- orientation de  $\vec{B}$  = orientation indiquée par le pôle nord de l'aiguille aimantée placée en P
- norme de  $\vec{B}$  = intensité du champ magnétique en Tesla (définition du Tesla cf. E3)



Appareil de mesure: Teslamètre



Ordre de grandeurs: aimants permanents  $B \approx 0,020\text{T} - 0,1\text{T}$ , Superaimant  $B \approx 0,5 - 1\text{T}$  !  
Electroaimants  $B \approx 1\text{T}$ . Autre unité 1 Gauss = 1G =  $1 \cdot 10^{-4}\text{T}$ . Champ terrestre  $B \approx 0,5\text{ G}$ .

### 3) Les spectres magnétiques

#### a) Définition

On appelle ligne de champ magnétique une ligne continue tel que  $\vec{B}$  lui est en tout point tangent. Ces lignes sont orientées dans le sens de  $\vec{B}$ , se referment toujours et ne se croisent jamais.

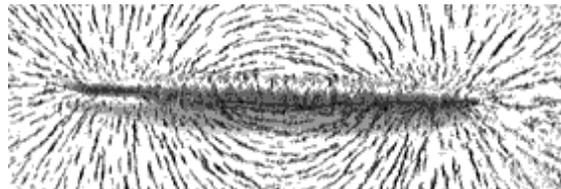
Spectre = ensemble de lignes de champs

On peut visualiser l'allure des lignes de champ par de la limaille de fer qui s'arrange comme une chaîne d'aiguilles aimantées parallèlement au champ. Plus les lignes de champ se resserrent plus le champ B est intense.

sans champ:



avec champ : (fil de fer aimanté)



[Film limaille de fer dans l'eau](#)

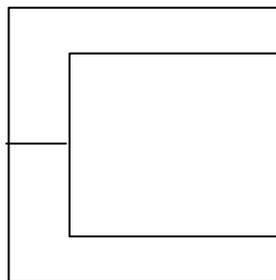
#### b) Exemples: Aimants permanents

Spectre d'un aimant droit (barre aimantée)



[http://www.walter-fendt.de/html5/phfr/magneticfieldbar\\_fr.htm](http://www.walter-fendt.de/html5/phfr/magneticfieldbar_fr.htm) (déplacer la boussole)  
[film exploration du champ d'un aimant droit](#)

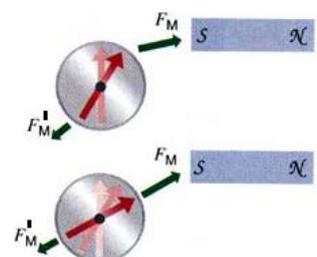
Spectre d'un aimant en U



$\vec{B}$  uniforme

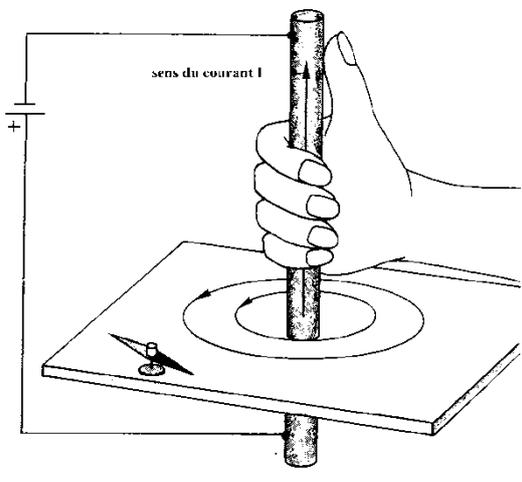
Noter que le champ a deux effets :

- 1) il tourne l'aiguille aimantée resp. [aimante la matière ferromagnétique](#) par un moment de force.
- 2) il attire l'aiguille ou la matière aimantée vers les zones où B est plus intense c.à.d. vers les pôles (force résultante  $F_M - F_{M'}$ )

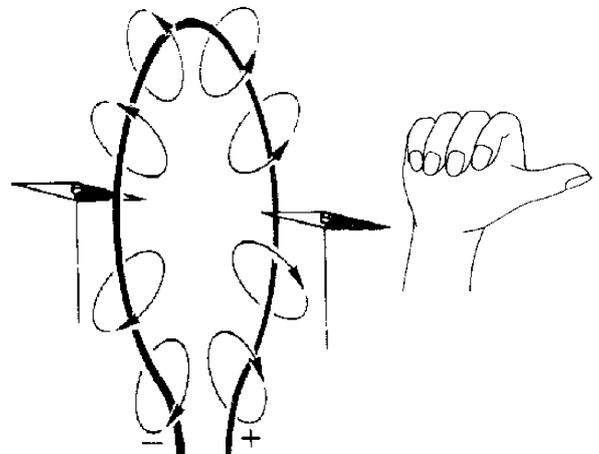


**c) Exemples: Spectres de conducteurs traversés par un courant**

*fil rectiligne*



*boucle de courant* (⇔ bobine plate)



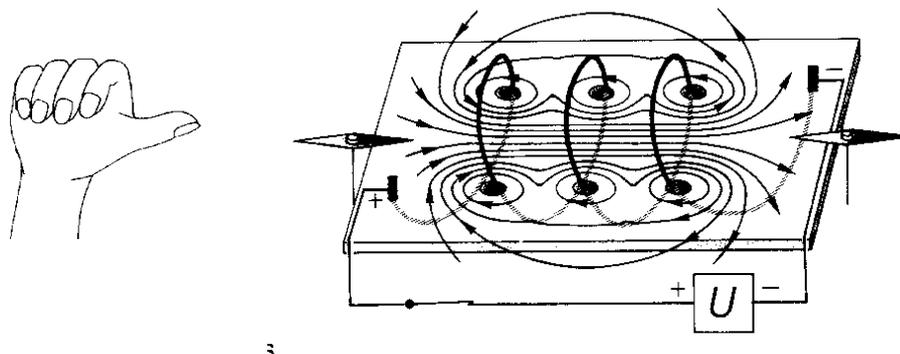
Règle de la main droite 1:  
pouce = sens du courant I  
doigts courbés = orientation de  $\vec{B}$

Règle de la main droite 2:  
doigts courbés = sens de I  
pouce = orientation de  $\vec{B}$

[http://www.walter-fendt.de/html5/phfr/magneticfieldwire\\_fr.htm](http://www.walter-fendt.de/html5/phfr/magneticfieldwire_fr.htm)

**Solénoïde** = enroulement régulier de plusieurs spires d'un fil conducteur isolé.

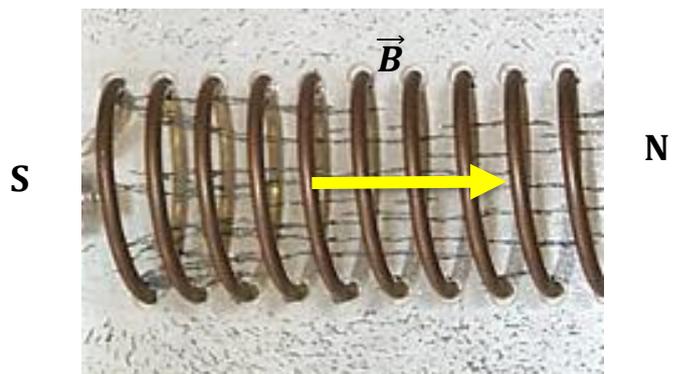
Le champs des différentes spires se superposent et il se forme un champ uniforme à l'intérieur de la bobine.



Vu de l'extérieur, le spectre d'un solénoïde équivaut au spectre d'un aimant droit. Il présente comme lui une face sud et une face nord. Les lignes se ferme à l'extérieur du N vers le S.

A l'intérieur on a un champ B uniforme qui part de S et sort par N.

B augmente avec l'intensité du courant.



[Applet : Mesure de B autour d'un aimant droit ou électro-aimant](#)

**d) champ magnétique terrestre**

Le champ géomagnétique est lié aux mouvements de rotation de la Terre est des courants de convection de matières dans le noyau de fer liquide au centre du globe.

En un point P de la surface du globe on décompose le champ magnétique terrestre  $\vec{B}$  en une composante verticale :

$$B_{vert} = B \cdot \sin i = \quad T$$

et une composante horizontale :

$$B_{hor} = B \cdot \cos i = \quad T$$

Rem :  $B_h$  indique le nord et oriente la boussole qui tourne autour d'un axe vertical.

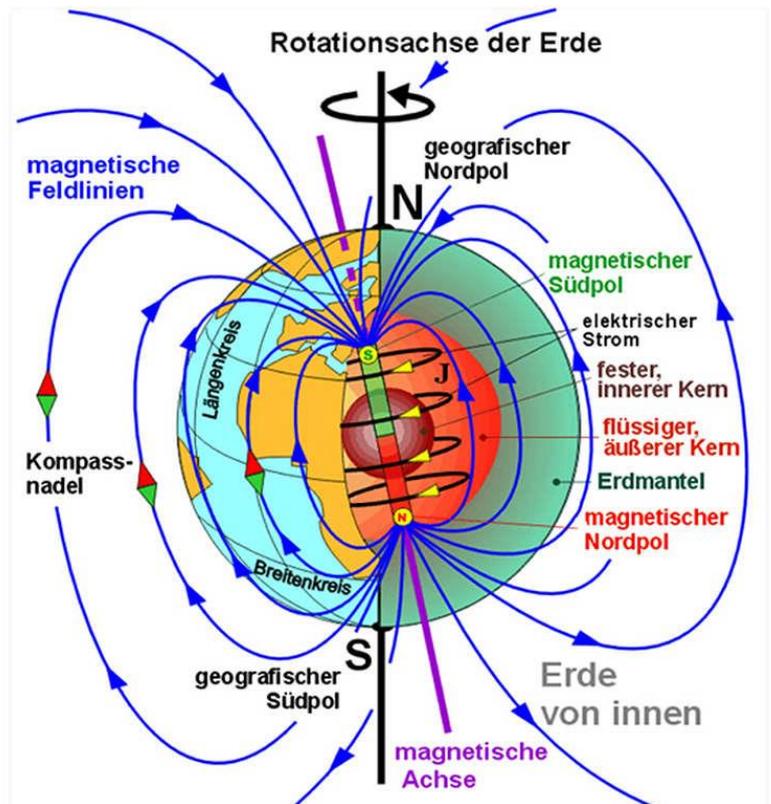
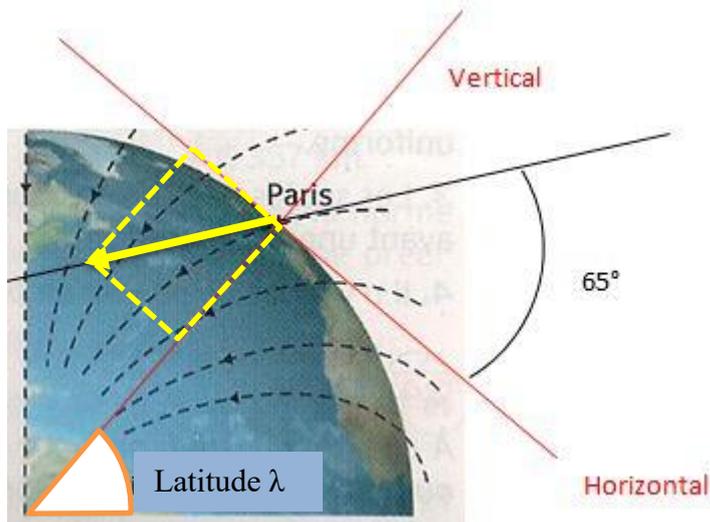


Illustration à Paris :  
 $i = 65^\circ$   $B = 4,7 \cdot 10^{-5} T$

Applet : [Mesure de B autour de la Terre](#) (cliquer modéliser Terre et placer la boussole)



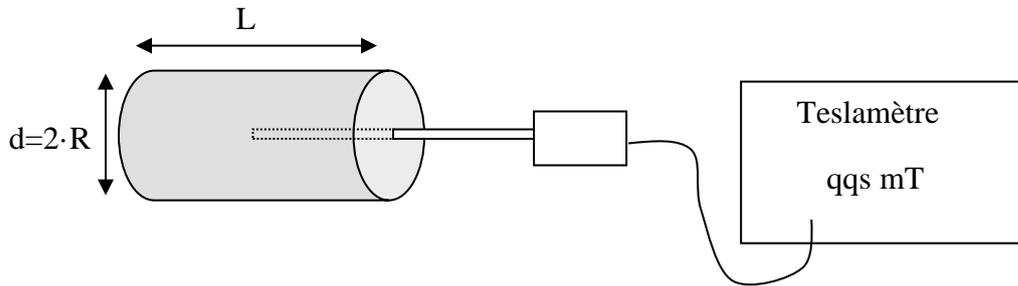
Expérience à domicile **dans le jardin** :  
Handy App : Magnetsensor x,y,z

Noter  $B_x, B_y, B_z$  tourner le smartphone pour annuler  $B_y$  une composante. On a alors  
 $B_x = B_{hor} =$  et  $B_z = B_{vert} =$   
Déduire la norme  $B$  et l'angle d'inclinaison  $i$  par rapport à l'horizontale.

$$B = \quad \quad \quad i = \tan^{-1} \left( \frac{B_z}{B_x} \right)$$

#### 4) Champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde long

*Etude expérimentale (en TP ou en classe)*



A l'aide d'un teslamètre muni d'une sonde longitudinale, on mesure le champ magnétique à l'intérieur de différents solénoïdes. Chaque solénoïde est formé par un enroulement de N spires sur un cylindre de longueur L et de rayon R. Un générateur fournit le courant continu I.

On parle d'un solénoïde long si  $L > 10 \cdot R$

On montre expérimentalement que

$$\left. \begin{array}{l} B \propto I \\ B \propto \frac{N}{L} = n \\ B \text{ indépt. de } R \end{array} \right\} \Rightarrow B = k \cdot I \cdot \frac{N}{L}$$

La constante de proportionnalité k s'écrit usuellement

$$\boxed{\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ S.I. perméabilité du vide}} \text{ ( qui vaut aussi pour l'air)}$$

L'intensité du champ magnétique B à l'intérieur d'un solénoïde long vaut:

$$\boxed{B = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{L} = \mu_0 \cdot n \cdot I} \text{ avec } n = N/L = \text{nombre de spires par mètre}$$

#### **Propriété de B dans le vide**

De manière générale pour un circuit quelconque sans noyau ferromagnétique:

$$\boxed{B \propto I \Leftrightarrow B = C \cdot I}$$

La constante de proportionnalité C dépend de la forme du circuit et de la position du point de mesure. Le rôle du noyau en fer est d'amplifier le champ.

#### **Exercices :**

1) Une bobine de longueur  $l=20\text{cm}$  comporte  $N=1000$  spires de diamètre  $d=3\text{cm}$ . Elle est traversée par un courant d'intensité  $I=200\text{mA}$ .

- Peut-on considérer ce solénoïde comme long ?
- Quelle est la valeur du champ à l'intérieur ? (Res. :  $B=1,25\text{mT}$ )
- Pour quelle valeur de I, l'intensité est égale à  $B_h$  terrestre. (Res. :  $I=3,18\text{mA}$ )

2) Un solénoïde de  $60\text{cm}$  de long comporte 400 spires. Son axe est horizontal et perpendiculaire au plan du méridien magnétique terrestre. Au centre de ce solénoïde, on place une petite aiguille aimantée horizontale, mobile librement autour d'un axe vertical.

- En l'absence de courant dans le solénoïde, préciser l'orientation de l'aiguille.
- Un courant d'intensité I traverse le solénoïde, la petite aiguille dévie d'un angle de  $80^\circ$  par rapport à sa position initiale. (Interpréter l'expérience dans une figure avec sens correct de I.)
- Calculer l'intensité du courant dans le solénoïde.  
(Composante horizontale du champ terrestre :  $B_h=2 \cdot 10^{-5}\text{T}$ )

## EM2 Forces de Lorentz et Laplace

### 1 Force magnétique de Lorentz (sur charge électrique)

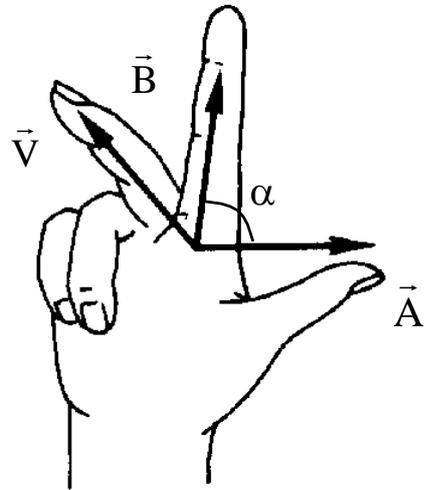
a) *Préliminaire mathématique: le produit vectoriel* ([regarder 1min20s](#))

$$\boxed{\vec{V} = \vec{A} \wedge \vec{B}} \text{ on lit A "vectoriel" B.}$$

*Caractéristiques:*

- direction: perpendiculaire au plan  $(\vec{A}, \vec{B})$
- sens: tel que le trièdre  $(\vec{A}, \vec{B}, \vec{V})$  soit direct  
règle des 3 doigts de la main droite  
 $\vec{A}$  = pouce,  $\vec{B}$  = index,  $\vec{V}$  = majeur
- norme:  $\|\vec{V}\| = V = A \cdot B \cdot \sin \alpha$  avec  $\alpha = \text{angle}(\vec{A}, \vec{B})$

Le résultat du produit vectoriel est un vecteur  $\vec{V}$  qui est à la fois perpendiculaire au vecteur  $\vec{A}$  et au vecteur  $\vec{B}$ . Sa norme est maximale et vaut  $V=A \cdot B$  si  $\vec{A} \perp \vec{B}$  c.à.d.  $\alpha=90^\circ$ ,  $V$  est nul si  $\vec{A} // \vec{B}$  c.à.d.  $\alpha=0^\circ$ .



Rem: Le résultat du produit scalaire est un nombre  $S = \vec{A} \cdot \vec{B} = A \cdot B \cdot \cos \alpha$ .

b) *Expression de la force de Lorentz*

Une particule de charge  $q$  animée d'une vitesse  $\vec{v}$  dans un champ magnétique  $\vec{B}$  subit une force magnétique de Lorentz

$$\boxed{\vec{f} = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}}$$

vect. force en N    charge (+ ou -) en C    vect. vitesse en m/s    vect. champ en T

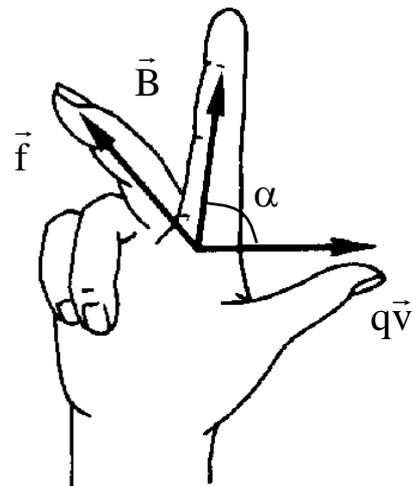
*Caractéristiques:*

- direction:  $\vec{f} \perp \vec{v}$  et  $\vec{f} \perp \vec{B}$
- sens: d'après la règle des 3 doigts de la main droite  
 $q\vec{v}$  = pouce,  $\vec{B}$  = index,  $\vec{f}$  = majeur  
Attention au signe de  $q$ !  
(evtl. prendre la main gauche pour les électrons)
- norme:  $f = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$  avec  $\alpha = \text{angle}(\vec{v}, \vec{B})$   
en particulier:  $f = |q| \cdot v \cdot B$  si  $\vec{v} \perp \vec{B}$   
 $f=0$  si  $\vec{v} // \vec{B}$

Rem: 1) La valeur absolue  $|q|$  de la charge intervient pour la norme,  $q$  (avec signe) dans la notation vectorielle.

2) Unité de  $B$ :  $B = \frac{f}{q \cdot v}$  en  $\frac{N \cdot s}{C \cdot m} = \frac{N \cdot s}{As \cdot m} = \frac{N}{A \cdot m} = T$  (Tesla)

$B=1T$  si une charge  $q=1C$  qui se déplace à  $v=1m/s$  de manière perp. au champ subit une force  $f=1N$ .



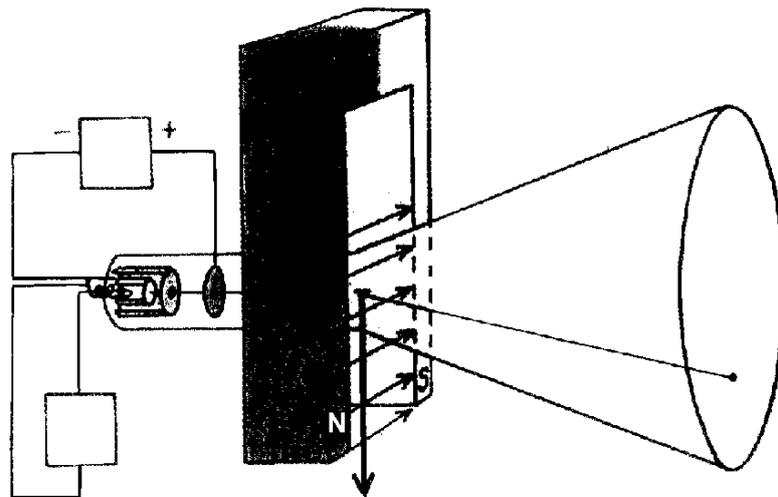
La force de Lorentz est perpendiculaire à la direction du mouvement de la particule et perpendiculaire au champ magnétique. Seuls les charges qui se déplacent exactement dans la direction des lignes de champ ne subissent pas de force.

La force de Lorentz est d'autant plus grande que:

- le champ  $B$  est intense
- la vitesse  $v$  est élevée
- la charge  $q$  de la particule est importante
- l'angle  $\alpha$  est proche de  $90^\circ$

**c) Mise en évidence expérimentale**

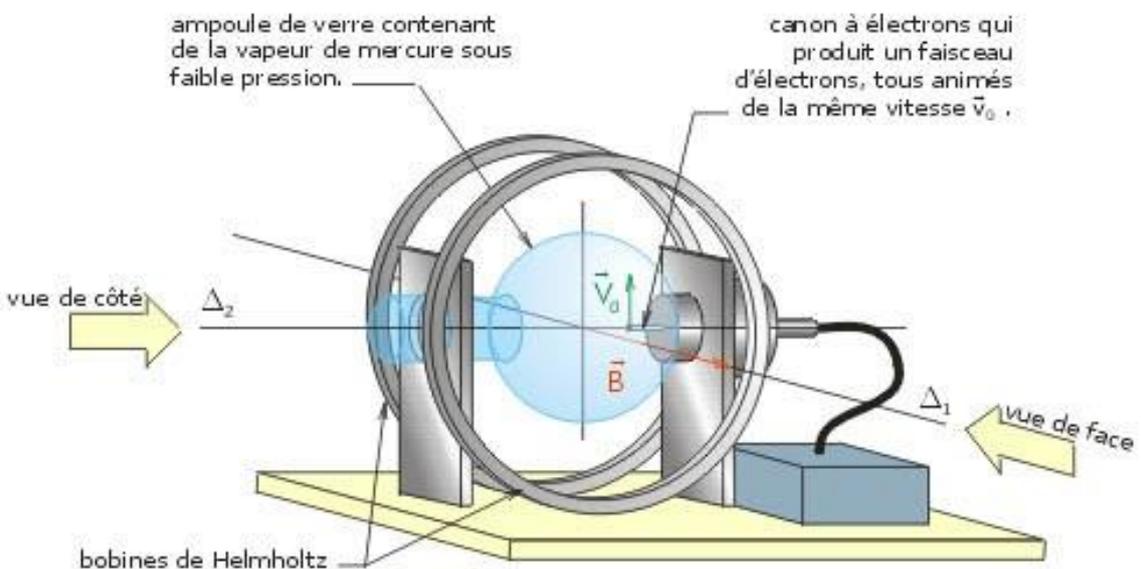
Sous E3,1,b) nous avons admis la formule donnant la force de Lorentz. A l'aide du tube de Braun nous pouvons observer la déviation d'un faisceau d'électrons par cette force magnétique. On peut ainsi vérifier qualitativement l'effet de l'intensité et de l'orientation du champ magnétique  $\vec{B}$  sur la force magnétique.



Exercices :

- 1) Inventer des situations  $q$ ,  $\vec{v}$ ,  $\vec{B}$  et prédire  $\vec{F}$ . (Représentation vecteur perp. à la figure)
- 2) Interpréter trajectoire circulaire des électrons dans un tube à gaz raréfié.

Le canon à électrons

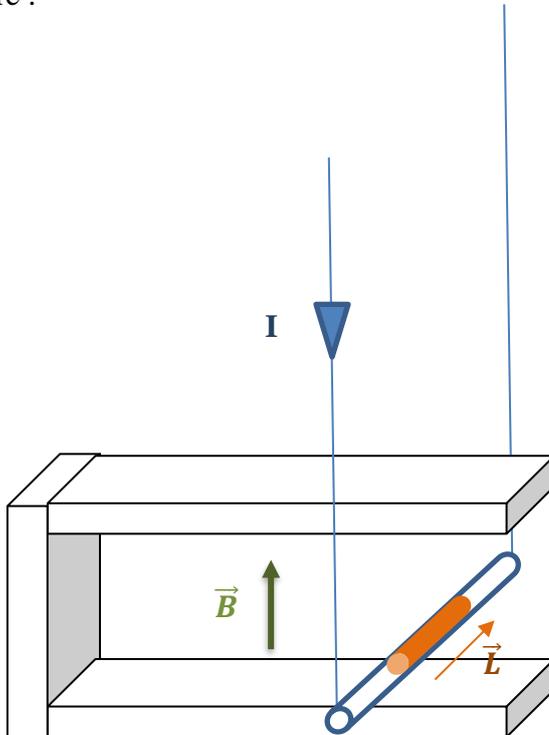


## 2 Force magnétique de Laplace (sur un conducteur)

### a) Expérience : balançoire électrique

Un conducteur rectiligne et placé dans l'entrefer d'un aimant en U. S'il est traversé par un courant I, il se déplace sous l'effet d'une force électromagnétique.

Figure :



$\vec{B}$  = champ magnétique externe

$\vec{L}$  = longueur exposée à  $\vec{B}$   
orientée dans le sens de I

I = intensité de courant

force de Laplace :

$$\vec{F} = I \cdot \vec{L} \wedge \vec{B}$$

[http://www.walter-fendt.de/html5/phfr/lorenzforce\\_fr.htm](http://www.walter-fendt.de/html5/phfr/lorenzforce_fr.htm)

Les électrons qui circulent à l'intérieur du fil exposé au champ magnétique subissent chacun une force de Lorentz  $\vec{f} = (-e) \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}$ . Puisque les électrons sont enfermés dans le conducteur, ces forces microscopiques se transmettent au fil pour donner la force de Laplace macroscopique.

Cette force a la même orientation que les force de Lorentz et sa norme augmente avec I et B. La force est maximale si I et B sont perpendiculaires.

**Norme dans le cas perpendiculaire:  $F_{\text{Laplace}} = I \cdot L \cdot B$**

**Unités : F en N, I en A, L en m et B en T =  $\frac{N}{A \cdot m}$**

### b) Expression (evtl. démonstration dans le cahier)

force de Laplace macroscopique sur le conducteur	=	somme des forces de Lorentz microscopiques sur les électrons
---	---	---

### c) Applications : Moteur électrique

[http://www.walter-fendt.de/html5/phfr/electricmotor\\_fr.htm](http://www.walter-fendt.de/html5/phfr/electricmotor_fr.htm)

[Film anglais illustrant le perfectionnement réel](#)

[Bricolage](#)

**Exercices : Force de Lorentz et Loi de Laplace**

1) Un électron est accéléré sous une tension de 700V avant de pénétrer dans un champ  $B=0,2T$ .

- a) Calculer sa vitesse.
- b) Quelle est la force et l'accélération à laquelle il est soumis dans le champ B

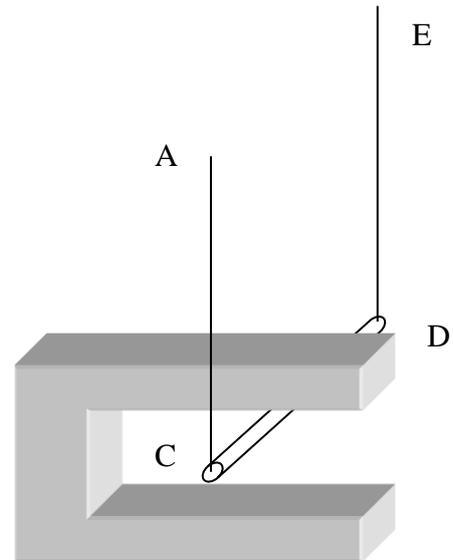
2)

a) Etablir l'expression de la force de Laplace qui s'exerce sur un conducteur rectiligne de longueur  $l$ , traversé par un courant  $I$  et qui plonge dans un champ magnétique uniforme  $B$ . Figure explicative.

b) Montrer que le moteur électrique est une application de la force de Laplace et expliquer de manière succincte son fonctionnement.

3) Une barre en cuivre CD, de masse  $m=5g$ , est soutenue par deux fils conducteurs verticaux AC et ED, de masse négligeable et de même longueur. La barre traverse un champ magnétique uniforme d'un aimant en U. Le champ vertical  $B=0,03T$  agit sur une largeur  $l=5cm$ . On fait passer un courant électrique d'intensité  $I$  de A vers E. La barre s'engage d'avantage entre les branches de l'aimant. A l'équilibre les fils AC et ED sont inclinés d'un angle de  $7^\circ$  par rapport à la verticale.

- Marquer les pôles nord et sud de l'aimant.
- Déterminer l'intensité du courant électrique.



$$\text{Corr. : } \frac{F}{P} = \tan \alpha \Rightarrow I \cdot L \cdot B = \tan \alpha \cdot m \cdot g \Rightarrow I = \frac{\tan \alpha \cdot m \cdot g}{L \cdot B} = 4 \text{ A}$$

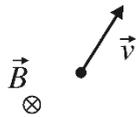
4) Le champ magnétique terrestre au Luxembourg a une intensité  $B=4 \cdot 10^{-5}T$  et une inclinaison  $i=70^\circ$  par rapport à l'horizontale. Trouver la force s'exerçant sur un fil horizontal de 5m où circule un courant de 200A en direction du nord géographique. Quelle est l'orientation de cette force?

$$\text{Corr. : } \text{L'angle entre } B \text{ et } L \text{ vaut } 70^\circ. F = I \cdot L \cdot B \cdot \sin 70^\circ = 0,0376N \text{ orienté vers l'ouest.}$$

5) **Force de Lorentz**

Déterminer dans les cas suivants la direction, le sens et l'intensité de la force de Lorentz si  $v=20000\text{m/s}$ ,  $B=0,1\text{T}$  et  $|q|=1,6 \cdot 10^{-19}\text{C}$

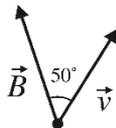
a)  $q < 0$



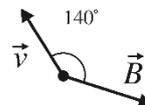
b)  $q > 0$



c)  $q > 0$



d)  $q < 0$

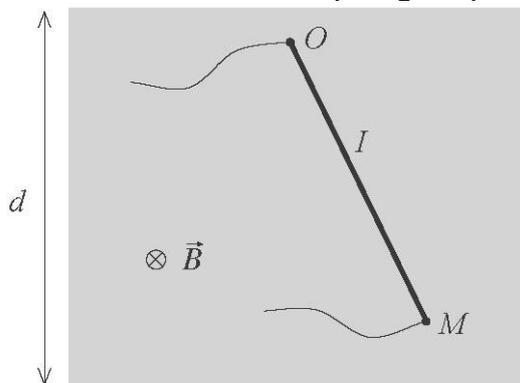


6) **Force de Laplace**

Un fil en cuivre de longueur  $l=50\text{cm}$  est traversé par un courant d'intensité  $I=10\text{A}$ . Il se trouve dans un plan horizontal et est perpendiculaire à la direction Sud-Nord magnétique. L'inclinaison du champ magnétique terrestre est  $i=60^\circ$ . Déterminer la direction et l'intensité de la force de Laplace.

7) **Force de Laplace**

Un conducteur en cuivre de masse  $m=100\text{g}$  et de longueur  $OM=25\text{cm}$ , mobile autour de  $O$ , est placé entre les pôles d'un aimant en U. Il est parcouru par un courant électrique d'intensité  $I=2\text{A}$ . L'intensité du champ magnétique uniforme qui s'étend sur  $d=30\text{cm}$  est  $B=0,8\text{T}$ .



- Déterminer le sens du courant électrique.
- Représenter sur une figure les forces qui agissent sur le conducteur.
- Calculer, à l'équilibre, l'angle  $\theta$  entre le conducteur et la verticale.

## EM3 Induction électromagnétique

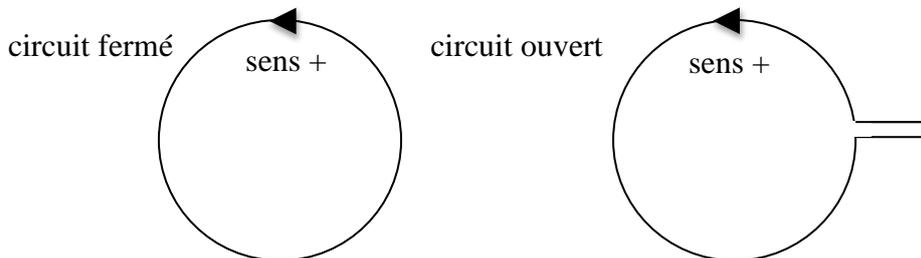
Un circuit parcouru par un courant crée un champ magnétique (cf. EM1). L'effet inverse où un champ magnétique produit (induit) un courant électrique à l'intérieur d'un circuit est appelé INDUCTION.

### 1. Définition du flux magnétique

On parle de flux magnétique si un circuit électrique baigne dans un champ magnétique  $\vec{B}$ .

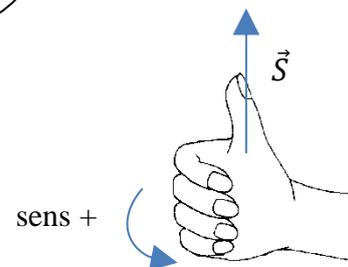
#### a) Vecteur surface $\vec{S}$ d'un circuit

Pour caractériser un circuit filiforme plan, on fixe de manière arbitraire un sens de parcours positif et on définit le vecteur surface  $\vec{S}$



Caractéristiques de  $\vec{S}$  :

- direction normale au plan du circuit
- sens donné par la règle de la main droite
- norme=aire du circuit en  $m^2$



#### b) Flux magnétique $\Phi$

Si un circuit plan de vecteur surface  $\vec{S}$  plonge entièrement dans un champ magnétique  $\vec{B}$  uniforme.

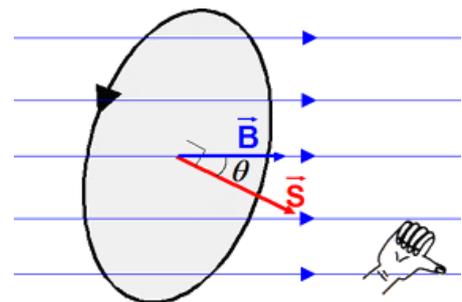
Le flux magnétique  $\Phi$  à travers le circuit vaut:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos \theta$$

avec  $\theta = (\vec{B}, \vec{S})$

Unités S.I.:

$B$  en T,  $S$  en  $m^2$  et  $\Phi$  en  $T \cdot m^2 = Wb$  (Weber)



Pour une bobine constituée de  $N$  spires parallèles, de surface  $S_{tot} = N \cdot s$ , placée dans un champ magnétique uniforme  $\vec{B}$ , le flux vaut:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}_{tot} = N \cdot \vec{B} \cdot \vec{s} = N \cdot B \cdot s \cdot \cos \theta$$

Remarques:

- 1) Le flux magnétique correspond au nombre de lignes de champ qui traversent un circuit (analogie pluie).
- 2) Si le champ n'est pas rigoureusement homogène, on prendra  $\vec{B}$  au centre du circuit.



## 2. Mise en évidence expérimentale du phénomène d'induction

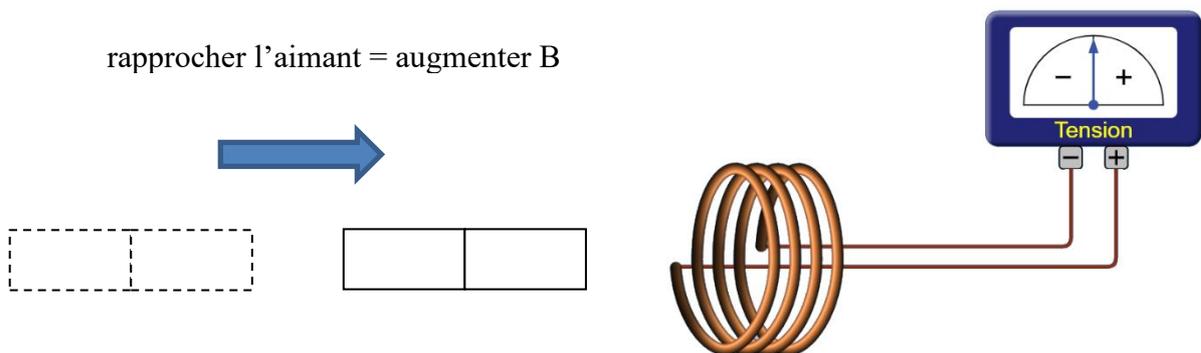
Pour mettre en évidence le phénomène d'induction on peut:

- fermer le circuit à l'aide d'un ampèremètre qui détecte le courant induit
- relier le circuit ouvert sur un voltmètre pour visualiser la tension induite

### Expérience 1:

Le rapprochement ou l'éloignement d'un aimant droit (inducteur) devant une bobine (induit) fait apparaître un courant induit (ou une tension induite) dans la bobine.

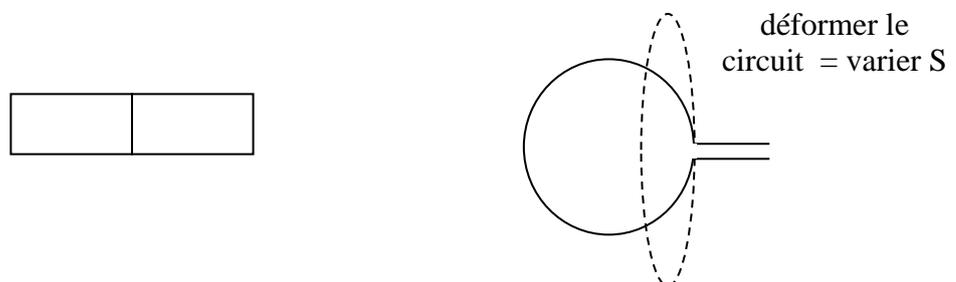
Variation de l'intensité de  $B \Rightarrow$  Induction



### Expérience 2:

L'augmentation ou la diminution de la superficie du circuit soumise au champ  $\vec{B}$  fait apparaître un courant induit (ou tension induite). (Également expérience rail avec tige.)

Variation de  $S \Rightarrow$  Induction



### Expérience 3:

Toute rotation du circuit par rapport au champ magnétique  $\vec{B}$  fait apparaître un courant induit.

Variation de l'angle  $\theta = (\vec{B}, \vec{S}) \Rightarrow$  Induction



### Conclusion:

Si le flux magnétique  $\Phi = B \cdot S \cdot \cos \theta$  à travers un circuit varie, il apparaît une force électromotrice (tension) induite qui se manifeste par:

- un courant induit si le circuit induit est fermé
- une tension induite aux bornes du circuit s'il est ouvert

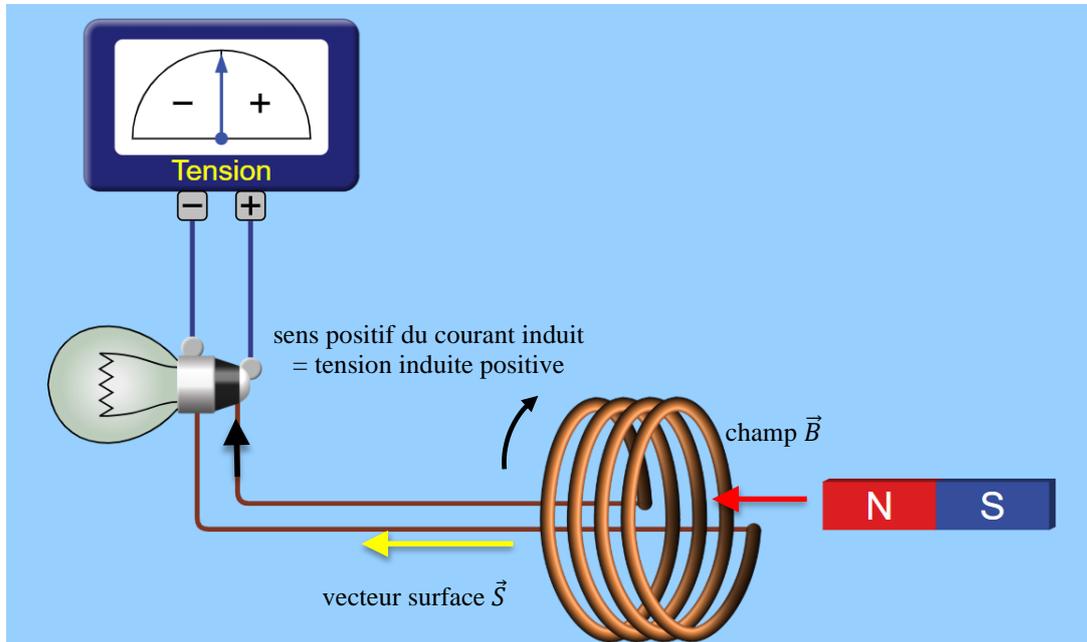
**Le phénomène d'induction n'existe que pendant la durée de la variation du flux.**

Le circuit induit (normalement une bobine) joue le rôle d'un générateur.

### 3. Lois de l'induction

#### a) Loi de Lenz (sens du courant induit)

**Expérience:** On rapproche ou éloigne un aimant permanent (inducteur externe) d'une bobine. Il s'agit de déterminer le sens du courant induit lors de la variation du flux qui en résulte.

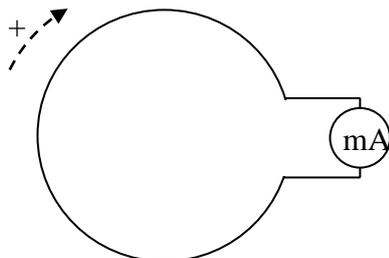


On fixe le sens de parcours positif de manière à ce que  $\vec{B}$  et  $\vec{S}$  aient même sens pour avoir  $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} > 0$ . Le **courant induit  $i$**  est *positif* s'il circule dans le sens *positif*.

Le courant induit  $i$  crée dans la bobine un **champ magnétique induit**  $\vec{b}$  orienté selon la règle de la main droite.

Illustration vue de devant côté aimant

**1. cas:** on augmente le champ B



**Cause:**

B augmente

$$\Rightarrow \Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} > 0 \text{ augmente}$$

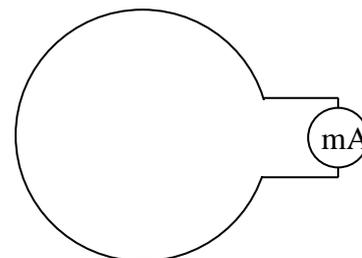
$$\Rightarrow \Delta\Phi > 0$$

**Effet:**

courant induit  $i < 0$  (sens négatif)

$$\Rightarrow \vec{b} \text{ opposé à } \vec{B} \text{ (répulsion)}$$

**2. cas:** on diminue le champ B



**Cause:**

$\vec{B}$  diminue

$$\Rightarrow \Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} > 0$$

$$\Rightarrow \Delta\Phi < 0$$

**Effet:**

$i > 0$

$$\Rightarrow \vec{b} \text{ de même sens que } \vec{B} \text{ (attraction)}$$

#### Loi de Lenz:

Le sens du courant induit  $i$  est tel qu'il tente, par ses effets, de s'opposer à la variation du champ et du flux magnétique qui lui donne naissance.

*Expérience :* Anneau éjecté si on branche une bobine avec noyau de fer.

## b) Loi de Faraday (expression algébrique de la fém)

Expérimentalement on montre que la fém est d'autant plus grande que la variation du flux est grande et rapide. Le paramètre clé est donc le taux de variation du flux  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ . D'autre part selon

la loi de Lenz on sait que  $i$  et  $\Delta\Phi$  ont toujours signe opposé.

### Loi de Faraday

Si le flux magnétique  $\Phi$ (en Wb) à travers un circuit varie en fonction du temps  $t$  (en s), la fém (=force électromotrice) induite  $e$  (en V) est donnée par

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{valeur instantanée de } e = - \text{dérivée du flux})$$

Remarques:

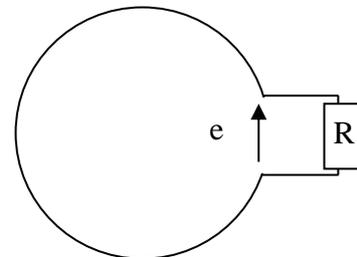
- $e > 0$  signifie que  $i$  circule dans le sens positif choisi. ( $e < 0$  signifie que  $i < 0$ )
- $e_{\text{moy}} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$

Une bobine traversée par un flux variable joue le rôle d'un générateur de fém  $e$ . Si le circuit est fermé et sa résistance totale vaut  $R$ , alors on peut calculer l'intensité du courant induit d'après la loi d'Ohm:

$$e = R \cdot i \quad (i \text{ et } e \text{ ont même signe})$$

$$\Rightarrow i = \frac{e}{R} = - \frac{1}{R} \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

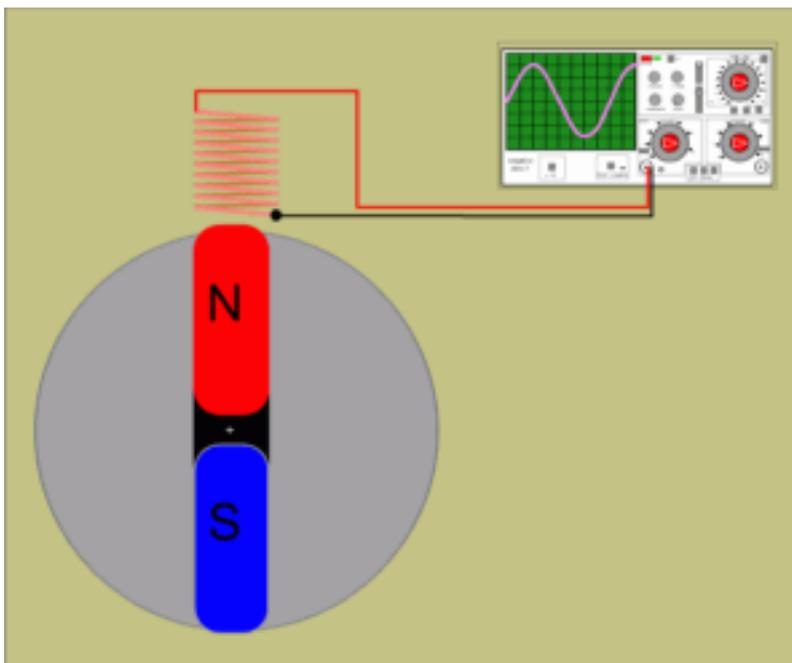
[Film : Crash-course induction](#)



## 4. Application : l'Alternateur

### a) Alternateur à induit fixe (et aimant inducteur mobile)

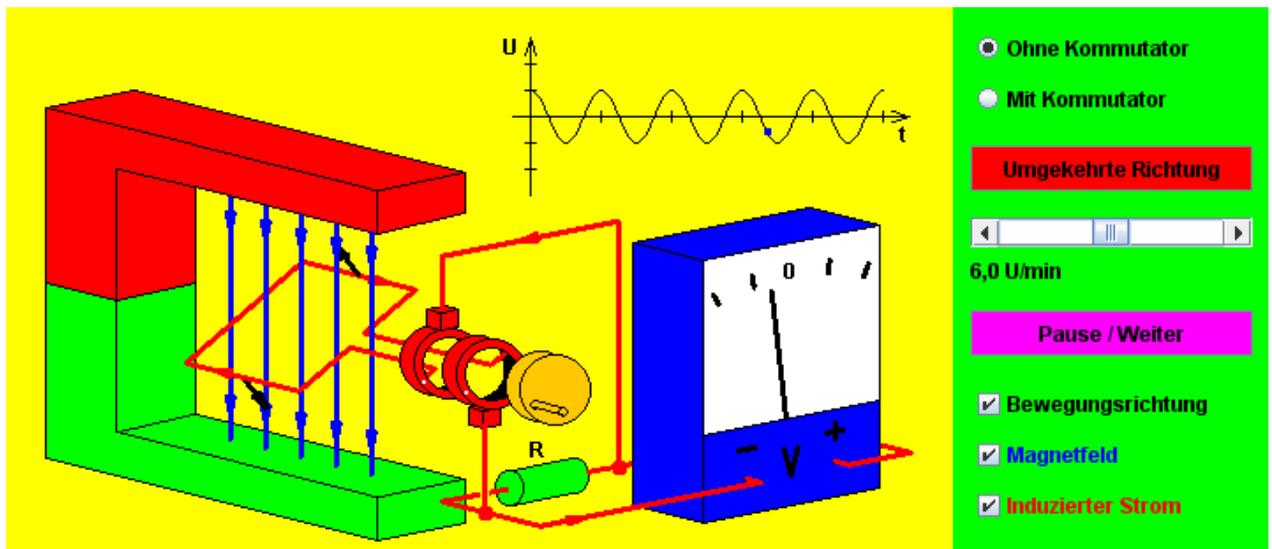
Un aimant tourne devant une bobine fixe.



[http://guy.vielh.free.fr/fiches/aimant\\_tournant.htm](http://guy.vielh.free.fr/fiches/aimant_tournant.htm)

### b) Alternateur à induit mobile (et aimant inducteur fixe)

Une bobine plate tourne dans un aimant fixe.



[http://www.walter-fendt.de/html5/phfr/generator\\_fr.htm](http://www.walter-fendt.de/html5/phfr/generator_fr.htm)

### c) Expression de la fém induite

L'angle entre le champ  $\vec{B}$  et l'orientation du vecteur surface  $\vec{S}$  change à cause de la rotation avec une vitesse angulaire constante  $\omega$  en rad/s.

$$\theta = \omega \cdot t \quad \text{et} \quad \Phi = B \cdot S \cdot \cos \omega t$$

B et S sont constants mais le flux varie *de manière sinusoïdale* d'où par dérivation :

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d(B \cdot S \cdot \cos \omega t)}{dt} = - B \cdot S \cdot \frac{d \cos(\omega t)}{dt} = B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin(\omega t)$$

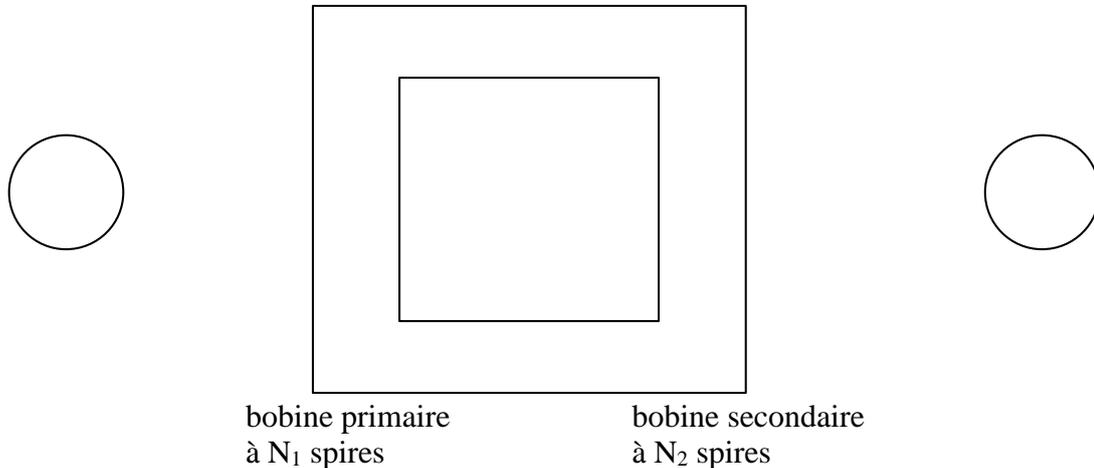
Il s'agit d'une tension alternative dont l'amplitude augmente avec la vitesse de rotation. Un alternateur qui tourne plus vite produit une tension plus élevée avec une fréquence plus élevée.

Simulation PHET : aimant+bobine=induction, aimant tournant + bobine = alternateur, électroaimant + bobine=transformateur.

## 5. Application: le transformateur

Comment peut-on avoir une tension induite dans une bobine sans avoir un aimant ou une bobine tournante ?

Soient 2 bobines couplées par un noyau ferromagnétique qui canalise le champ magnétique.



Si la bobine primaire est reliée à une tension alternative, elle sera traversée par un courant alternatif  $i_1$  qui crée un champ magnétique alternatif. Ce champ  $B$  est amplifié et guidé par le noyau de fer. Si on suppose que les lignes de champ ne quittent pas le noyau, le flux magnétique  $\varphi = B \cdot S$  est le même pour chaque spire des 2 bobines.

Ainsi le flux total s'écrit

pour la bobine primaire:  $\Phi_1 = N_1 \cdot \varphi$

pour la bobine secondaire:  $\Phi_2 = N_2 \cdot \varphi$

D'après la loi de Faraday, la tension induite par le flux alternatif dans les 2 bobines (supposées sans résistance interne) vaut:

$$u_1 = - \frac{d\Phi_1}{dt} = -N_1 \cdot \frac{d\varphi}{dt}$$

$$u_2 = - \frac{d\Phi_2}{dt} = -N_2 \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{Rem: On choisit la polarité de } u_2 \text{ pour avoir 2 fois le même signe})$$

Noter qu'il s'agit de tensions alternatives qu'on note  $u = U_m \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t)$

avec  $f$  = fréquence en Hz ; tension instantanée  $u$  ; tension max  $U_m$  ; tension efficace  $U = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot U_m$

On en déduit la loi des tensions pour le transformateur:

$$\boxed{\frac{u_2}{u_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1}} \quad \text{relation pour } u \text{ (instantané) vaut aussi pour } U \text{ (efficace)}$$

Si on suppose le transformateur sans pertes,

$$\begin{aligned} \text{puissance d'entrée} &= \text{puissance de sortie} \\ P_1 = U_1 \cdot I_1 &= P_2 = U_2 \cdot I_2 \end{aligned}$$

d'où la loi des intensités pour le transformateur:

$$\boxed{\frac{I_2}{I_1} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}} \quad \text{ces relations valent aussi pour les valeurs maximales } U_m \text{ et } I_m.$$

**Exemples pratiques:**

$N_2 > N_1$

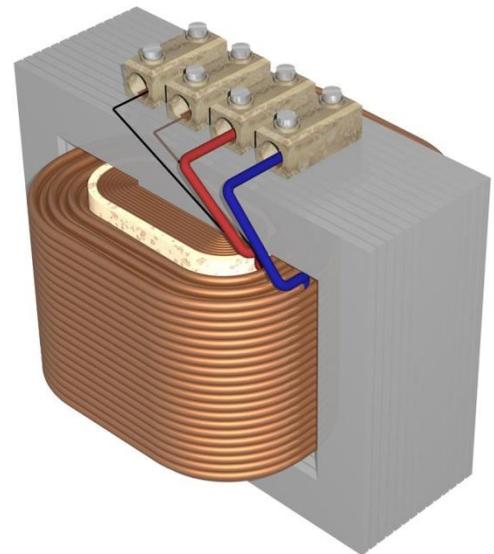
- Production d'une haute tension pour diminuer les pertes de transport dans les lignes de tension (abaissement du courant et des pertes par échauffement)
- Production d'une haute tension pour produire une étincelle

$N_2 < N_1$

- Réduction de la tension pour alimenter des appareils électroniques
- Production d'un courant important pour le soudage électrique
- abaisseur de tension  $N_2 < N_1$  (augmentation du courant et de l'échauffement)

$N_2 = N_1$

- Transformateur d'isolement  $N_2 = N_1$  (Trenntrafo) séparer les deux pôles du secondaire complètement du potentiel de la bobine primaire.



**Pertes :**

- Pour un transformateur réel  $P_1 > P_2$ , et  $U_2$  et  $I_2$  à la sortie seront plus faibles que prévus.
- Pour minimiser les pertes les bobines d'un transformateur sont souvent concentriques et enroulés sur le même noyau fermé.(cf. figure)

<http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/transformer/index.html>

