

- Les phénomènes d'induction électromagnétique furent découverts par Michaël Faraday en 1831. Les courants permanents produisent des champs magnétiques, et c'est en cherchant expérimentalement à mettre en évidence, mais sans succès une réciprocité stricte que Faraday découvrit l'effet des variations de flux magnétique à travers un circuit.
  - L'induction électromagnétique intervient de façon omniprésente dans le domaine de l'électrotechnique, c'est-à-dire pour la production, le transport et l'utilisation des énormes quantités d'énergie électrique nécessaire aux sociétés industrielles.
- D'où l'importance et la multiplicité des applications industrielles de l'induction électromagnétique (moteurs, alternateurs, transformateurs, haut-parleurs, chauffage à induction...)

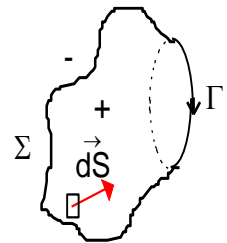
## I. Le flux

### I.1. Élément de surface

- Soit  $\Sigma$  une surface s'appuyant sur un contour fermé  $\Gamma$ . Le sens de la normale en un point M de la surface est lié de façon conventionnelle au sens de circulation positif sur le contour.

#### Règles pratiques

- « **Le tire bouchon de Maxwell** » On fait tourner le tire-bouchon dans le sens de rotation positif choisi pour  $\Gamma$ . Le sens de translation du tire-bouchon donne le sens de la normale positive.
- « **La règle de la main droite** » Les doigts de la main droite épousent le sens de rotation positif choisi pour  $\Gamma$ , le pouce ouvert donne le sens de la normale positive.



- Vecteur élément de surface : Soit M un point de  $\Sigma$  entouré d'un élément de surface  $dS$

$$\vec{dS} = dS \vec{n} \quad \vec{n} \text{ normale positive.}$$

### I.2. Définition du flux

Soit  $\vec{B}$  un champ magnétique défini dans une région  $\mathcal{D}$  de l'espace et  $\Sigma$  une surface dans cette région.

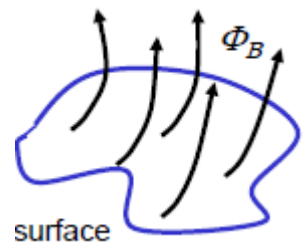
#### ➤ Le flux élémentaire

Soit M un point de  $\Sigma$  entouré d'un élément de surface  $dS$

$$\text{Flux élémentaire à travers } \vec{dS} = dS \vec{n} \quad d\Phi = \vec{B} \cdot \vec{dS} = (\text{scalaire})$$

#### ➤ Le flux du vecteur $\vec{B}$ à travers $\Sigma$

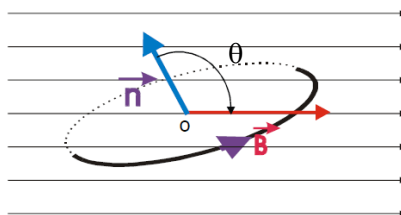
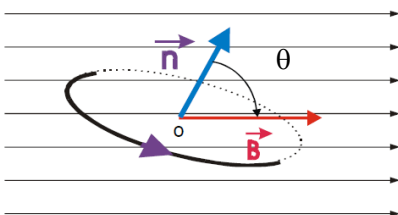
$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot \vec{dS}$$



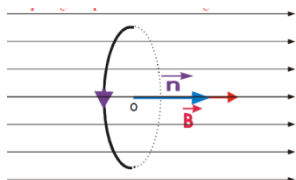
#### ➤ Cas d'un champ magnétique uniforme à travers une surface plane

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} = B.S. \cos\theta > 0$$

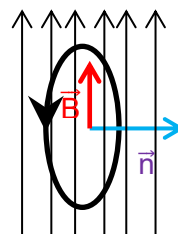
$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} = B.S. \cos\theta < 0$$



$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} = B.S$$



$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} = 0$$



- Unités:

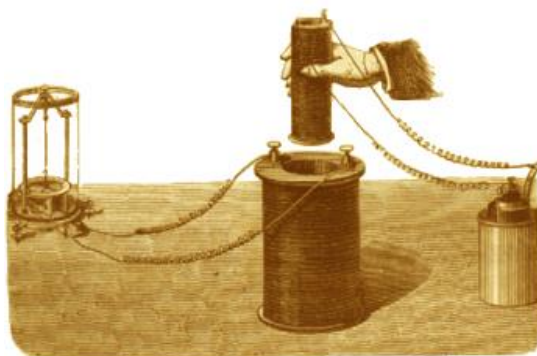
L'unité du flux du champ magnétique est le weber (Wb)

$$\text{Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2 = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$$

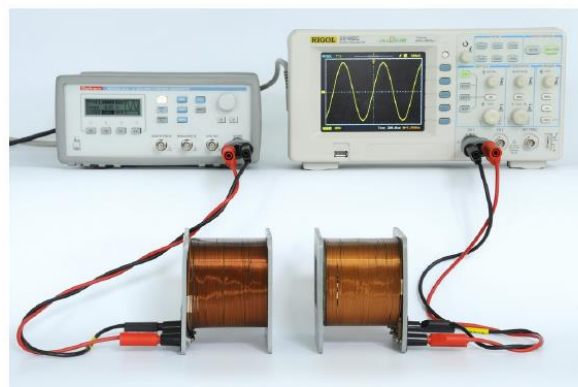
## II. Expériences d'induction électromagnétique

### II.1. Expérience historique de Faraday

- Le champ magnétique peut être créé par un courant. En 1831 Faraday se demanda si l'inverse était possible : créer un courant à l'aide d'un champ magnétique. Il a donc mis en regard deux bobines, l'une est alimentée par un générateur l'autre est reliée à un ampèremètre. Malheureusement rien n'est observé dans l'ampèremètre. C'est alors qu'en débranchant le générateur de la première bobine qu'il observe une déviation brève de l'aiguille de l'ampèremètre relié à la deuxième bobine. Après plusieurs expériences en changeant le noyau des bobines, l'intensité de la f.e.m, il arriva à la conclusion que c'était la variation du courant et donc du champ magnétique créée par la première bobine qui était à l'origine du courant créé dans la seconde.



- Expérience avec deux bobines et un courant variable  
On constate, à l'aide d'un oscilloscope, une tension sinusoïdale aux bornes de la bobine (courant induit). Cette tension n'est non nulle que si l'intensité du courant dans le solénoïde varie dans le temps. Si les axes des bobines sont perpendiculaires, on n'observe pas de tension induite.



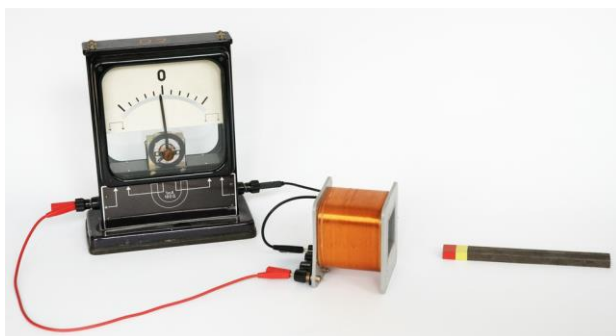
Ou encore



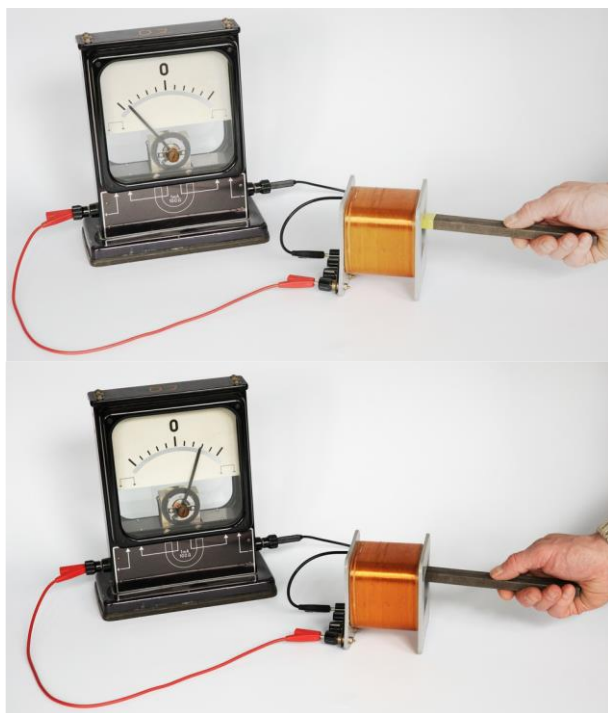
## II.2. Expérience d'un aimant et d'une bobine

On approche un aimant d'une bobine. La bobine est reliée à un ampèremètre à aiguille (circuit fermé), ce qui permet de détecter le passage d'un courant.

Le bout avec la bande claire de l'aimant est son pôle nord donc les lignes de champ magnétique sortent de ce bout et rentrent dans l'autre.



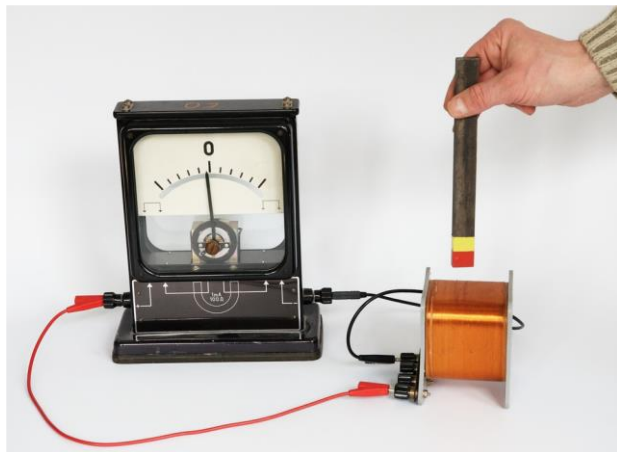
L'aimant est immobile : pas de courant



On approche la face nord de l'aimant de la bobine  $C$  (fixe dans le référentiel de l'observateur), l'aiguille du galvanomètre  $G$  dévie dans un sens ; il y a apparition d'un courant dit induit.

On éloigne la face N de l'aimant de  $C$  : il y a déviation de  $G$  dans l'autre sens.

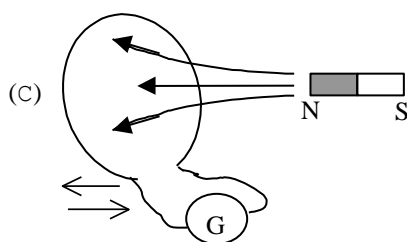
Plus la variation de  $\vec{B}$  est rapide (vitesse de déplacement de l'aimant), plus le courant est fort.



Si l'aimant est approché perpendiculairement à la bobine : le galvanomètre ne dévie pas.

- Les phénomènes précédents ne sont donc observables dans le circuit C que s'il est en placé d'un champ magnétique variable dans le temps. Un champ magnétique variable peut créer un courant induit dans un circuit à distance.
- Il ne suffit pas que le champ magnétique varie, son orientation par rapport au circuit a son importance.

### II.3. Circuit mobile dans un champ permanent



On déplace la bobine C dans le champ permanent de l'aimant fixe. Les observations sont les mêmes: apparition d'un courant induit.

- Si (C) est immobile,  $i = 0$
- Le signe de  $i(t)$  dépend du sens de déplacement de C par rapport à l'aimant.
- L'amplitude de  $i(t)$  augmente avec la vitesse de déplacement de C.

Un conducteur en mouvement dans un champ magnétique stationnaire peut aussi créer un courant induit dans un circuit à distance.

### II.4. Le phénomène d'induction électromagnétique

Les expériences vues permettent de mettre en évidence le phénomène d'induction électromagnétique. Il consiste en l'apparition d'une f.é.m., dite induite et, s'ils peuvent s'écouler, de courants induits dans un circuit électrique soumis à un flux magnétique variable au cours du temps.

Il suffit d'une des deux causes suivantes pour que le phénomène se manifeste :

- la présence dans la région où se trouve le conducteur d'un champ magnétique variable dans le temps, même si le conducteur est fixe.
- le déplacement d'un conducteur par rapport aux sources (aimants ou courants) d'un champ magnétique, même si celui-ci est permanent.

## III. Loi de modération de Lenz

### III.1. La loi

Dans tous les cas les phénomènes d'induction vérifient la loi de modération de Lenz :

Loi de Lenz : l'induction s'oppose toujours par ses effets à la cause qui l'a produite

Le courant induit dans un cadre (ou une bobine) est tel que le champ magnétique induit généré par ce courant dans la région à l'intérieur du cadre (ou de la bobine) s'oppose à la variation du flux magnétique (champ magnétique qui traverse une surface) externe qui traverse le cadre.

Cette loi explique le retard à l'établissement du courant dans le circuit RL vu en électricité

### III.2. Interprétation des expériences

#### • Cas 1

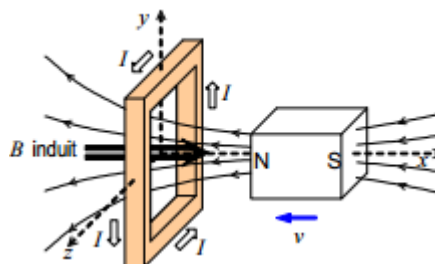
→ Aimant :

Le déplacement de l'aimant selon -x provoque une augmentation du flux du champ magnétique traversant la spire dans la direction -x

→ Courant induit

Il provoque une augmentation du flux du champ magnétique induit traversant le circuit dans la direction +x

Ou une diminution du flux du champ magnétique induit traversant dans la direction -x.



#### • Cas 2

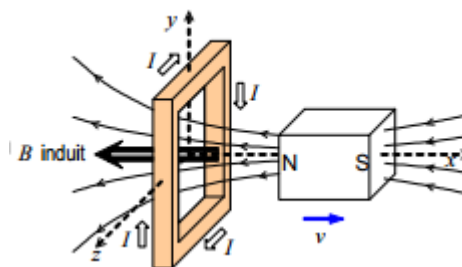
→ Aimant :

Le déplacement de l'aimant selon x provoque une diminution du flux du champ magnétique traversant la spire dans la direction -x

→ Courant induit

Il provoque une augmentation du flux du champ magnétique induit traversant le circuit dans la direction -x.

Ou une diminution du flux du champ magnétique induit traversant dans la direction +x.



### IV. Loi de Faraday

#### IV.1. Enoncé de la loi

L'étude expérimentale de la f.é.m. induite dans un circuit C fermé et orienté à travers lequel le flux magnétique  $\Phi(t)$  varie dans le temps, montre que la f.é.m. induite ne dépend que de la vitesse de variation du flux magnétique  $\frac{d\Phi}{dt}$  et qu'elle croît (en valeur absolue) avec celle-ci.

#### • Enoncé de la loi

Dans un circuit C électrique fermé et orienté, soumis à un flux magnétique  $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$  variable au cours du temps, il y a apparition d'un courant induit d'intensité égale à celle que produirait une source de tension idéale de f.e.m. : 
$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

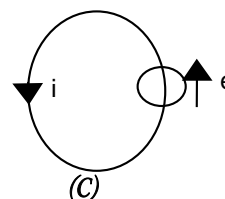
#### • Remarques :

- Le signe négatif dans la loi de Faraday est justifié par la loi de Lenz. Elle stipule que si la f.e.m. induite e produit un courant qui génère un champ magnétique et par le fait même un flux magnétique, celui-ci doit s'opposer à la variation qui le génère.

- La relation  $e = - \frac{d\Phi}{dt}$  est valable quelle que soit la cause de la variation de flux magnétique ((C) fermé) :

- (a) variation du champ magnétique au cours du temps ;
- (b) déplacement ou déformation d'un circuit dans un champ magnétique ;
- (c) action simultanée des causes précédentes.

Orientation du circuit choisie : e,  $\Phi$  et i (courant induit) sont algébriques. e est orienté dans le sens positif choisi pour le circuit.



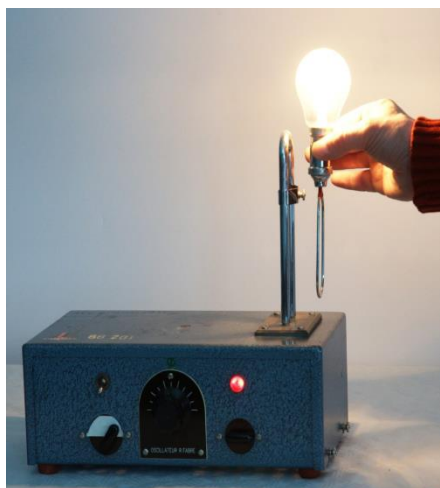
(Le sens réel du courant observé dans le circuit ne dépend évidemment pas de l'orientation choisie pour le circuit).



## IV.2. Mise en évidence expérimentale

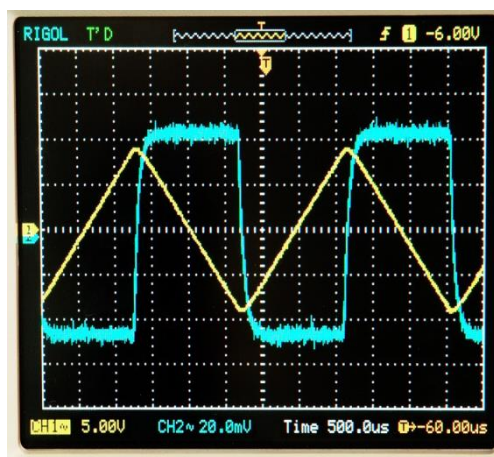
- Expérience 1 : le flux est la grandeur mise en jeu

Une antenne hyperfréquence (MHz) crée un champ magnétique dans l'espace perpendiculaire au plan de l'antenne. La lampe ne s'allume que quand le flux de  $B$  n'est pas nul et éclaire d'autant plus vivement que ce flux est important. Il y a alors environ 100 V à ses bornes.



- Expérience 2 : la f.e.m. est proportionnelle à l'opposé de la dérivée du flux par rapport au temps
- Un générateur alimente une première bobine de rayon  $a$  (que l'on pourra supposer infinie) avec un courant  $i_1$  triangulaire.

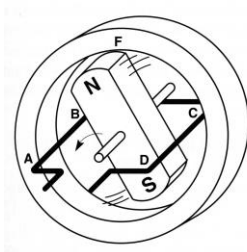
Une deuxième bobine ( $N_2$  spires, rayon  $b < a$ ) est insérée dans la première et on mesure la tension à ses bornes : on observe une tension créneau de valeur positive quand le triangle est décroissant.



## IV.3. Exemple d'utilisation

- Dynamo de vélo (alternateur)

Un générateur électrique peut être réalisé en faisant tourner un aimant (NS) à l'intérieur d'un cadre conducteur (ABCD). Le flux du champ magnétique à travers le cadre varie: une force électromotrice induite apparaît aux bornes du cadre. Des alternateurs de ce type sont placés dans le moyeu des bicyclettes: elles fournissent l'énergie électrique nécessaire à l'éclairage.



<u>I. Le flux</u> .....	<u>1</u>
<u>I.1. Elément de surface</u> .....	<u>1</u>
<u>I.2. Définition du flux</u> .....	<u>1</u>
<u>II. Expériences d'induction électromagnétique</u> .....	<u>2</u>
<u>II.1. Expérience historique de Faraday</u> .....	<u>2</u>
<u>II.2. Expérience d'un aimant et d'une bobine</u> .....	<u>3</u>
<u>II.3. Circuit mobile dans un champ permanent</u> .....	<u>4</u>
<u>II.4. Le phénomène d'induction électromagnétique</u> .....	<u>4</u>
<u>III. Loi de modération de Lenz</u> .....	<u>4</u>
<u>III.1. La loi</u> .....	<u>4</u>
<u>III.2. Interprétation des expériences</u> .....	<u>5</u>
<u>IV. Loi de Faraday</u> .....	<u>5</u>
<u>IV.1. Enoncé de la loi</u> .....	<u>5</u>
<u>IV.2. Mise en évidence expérimentale</u> .....	<u>6</u>
<u>IV.3. Exemple d'utilisation</u> .....	<u>6</u>