

EM 5 - Induction électromagnétique

On poursuit, dans ce chapitre, l'étude du lien entre magnétisme et électricité. Des courants électriques sont capables de générer des champs magnétiques (voir cours EM₄). À l'inverse, est-ce qu'un champ magnétique (créé par un aimant ou un circuit électrique) est capable de générer des courants électriques ?

I. Observation expérimentale

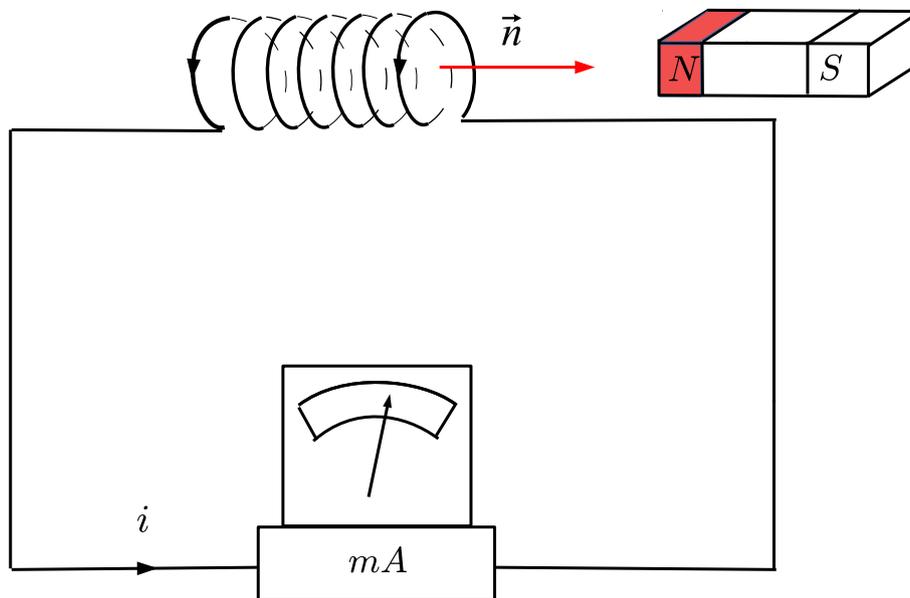
Présentation du phénomène d'induction :

<http://www.physagreg.fr/electromagnetisme-18-notions-induction.php>

Démonstration :

<http://phymain.unisciel.fr/principe-de-fonctionnement-dun-generateur-electrique/>

I.1. Description du montage



On utilise une bobine constituée d'un enroulement de fil de cuivre sur une surface cylindrique.

On oriente les spires : on en déduit le sens de \vec{n} par la règle du tire bouchon.

On oriente i dans le même sens que le circuit. Lorsque $i > 0$ l'aiguille est déviée vers la droite, lorsque $i < 0$, l'aiguille est déviée vers la gauche.

On approche (ou on éloigne) un aimant de la bobine. On peut conserver le même mouvement relatif en approchant ou en éloignant la bobine de l'aimant.

Déplacement de l'aimant :

<https://www.youtube.com/watch?v=JBh6WDVlLdE&feature=share&list=FL7jLNwlyO2h-R-OQX1dMUJA&index=7>

Déplacement de la bobine :

<https://www.youtube.com/watch?v=zxi74oTT9y4&feature=share&list=FL7jLNwlyO2h-R-OQX1dMUJA&index=6>

I.2. Observations

- Si on approche le pôle Nord de l'aimant il apparaît un courant $i > 0$ et donc un champ \vec{B} de sens opposé à celui de l'aimant :
⇒ la bobine présente alors un pôle Nord face à l'aimant ce qui tend à freiner l'avancée de l'aimant (les deux pôles se repoussent).
- Si le mouvement de l'aimant par rapport à la bobine cesse, le courant s'annule, bien que l'intensité du champ magnétique au niveau de la bobine soit importante.
⇒ pas de mouvement de l'aimant, pas de courant.
- Si on éloigne le pôle Nord de l'aimant il apparaît un courant $i < 0$ et donc un champ \vec{B} de même sens que celui de l'aimant :
⇒ la bobine présente alors un pôle Sud face à l'aimant ce qui tend à freiner le recul de l'aimant (les deux pôles s'attirent).

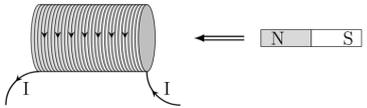
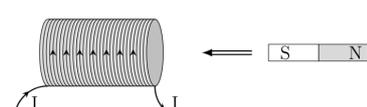
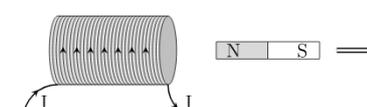
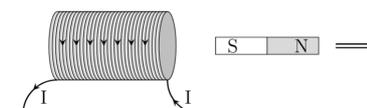
Bilan :

Les courants qui apparaissent dans la bobine sont appelés **courants induits**. Ils apparaissent si l'aimant est mobile par rapport à la bobine (ou la bobine mobile par rapport à l'aimant).

Dans le cas où l'aimant est mobile par rapport à la bobine, on observe que les courants induits tendent, par leurs effets, à s'opposer au mouvement de l'aimant :

- si l'aimant s'approche, la bobine présente un pôle qui tend à repousser l'aimant.
- si l'aimant s'éloigne, la bobine présente un pôle qui tend à attirer l'aimant.

Dans le tableau ci-dessous l'intensité est orientée de manière à avoir dans chaque cas $I > 0$.

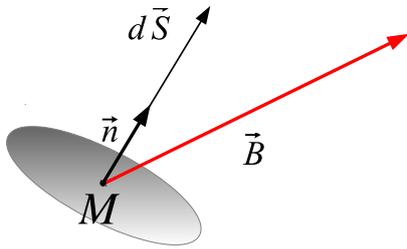
Expériences	Observations
	<p>Si on approche la face nord d'un aimant droit au voisinage de la bobine, c'est-à-dire un champ magnétique dirigé vers la gauche, alors un courant induit apparaît dans celle-ci dans un sens qui lui fait créer un champ magnétique vers la droite (on peut raisonner en terme de faces magnétiques : on approche une face nord, le circuit oppose alors une face nord).</p>
	<p>Si on approche une face sud, c'est-à-dire un champ magnétique dirigé vers la droite, un courant induit apparaît, son sens crée un champ magnétique dirigé vers la gauche (le circuit oppose une face sud à l'aimant).</p>
	<p>Si on éloigne une face nord, c'est-à-dire un champ magnétique dirigé vers la gauche, un courant induit apparaît, son sens crée un champ magnétique dirigé vers la gauche (le circuit présente une face sud à l'aimant).</p>
	<p>Si on éloigne une face sud, c'est-à-dire un champ magnétique dirigé vers la droite, un courant induit apparaît, son sens crée un champ magnétique dirigé vers la droite le circuit présente une face nord à l'aimant).</p>

Ces expériences peuvent être effectuées de la même manière en considérant l'aimant fixe et en déplaçant la bobine (on change de référentiel). Les résultats seront similaires.

Dans tous les cas, les courants induits s'opposent par leurs effets à la cause qui leur a donné naissance.

II. Flux du champ magnétique

II.1. Flux élémentaire



On considère une surface élémentaire dS au voisinage du point M . Soit \vec{n} un vecteur normal à cette surface. Le choix du sens de \vec{n} définit l'orientation de la surface. On définit alors $d\vec{S} = dS \vec{n}$ le vecteur surface élémentaire. Le flux élémentaire du champ magnétique à travers la surface orientée dS est défini par

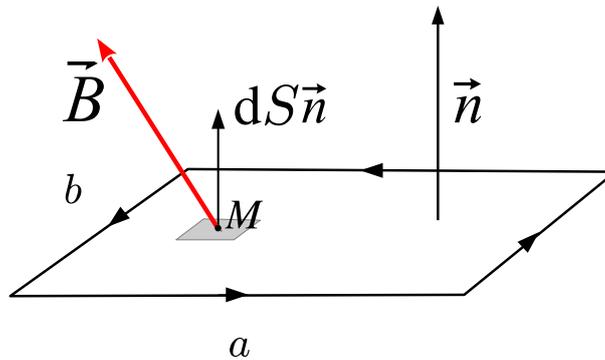
$$d\phi = \vec{B}(M) \cdot d\vec{S}$$

L'unité de flux est le weber (Wb) $1 \text{ W} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2$

Le signe de $d\phi$ dépend du sens d'orientation choisi.

II.2. Flux d'un champ magnétique uniforme à travers une spire

On considère une spire rectangulaire, de côtés a et b , placée dans un champ magnétique uniforme. Le sens de \vec{n} se déduit du sens d'orientation choisi pour la spire par la règle du tire-bouchon (ou de la main droite).



Par définition le flux de \vec{B} à travers la surface orientée S délimitée par la spire est

$$\phi = \iint_S \vec{B}(M) \cdot d\vec{S}$$

Le champ magnétique \vec{B} étant uniforme, on peut le sortir de l'intégrale. De plus, la surface étant plane, tous les vecteurs $d\vec{S}$ sont colinéaires au même vecteur \vec{n} :

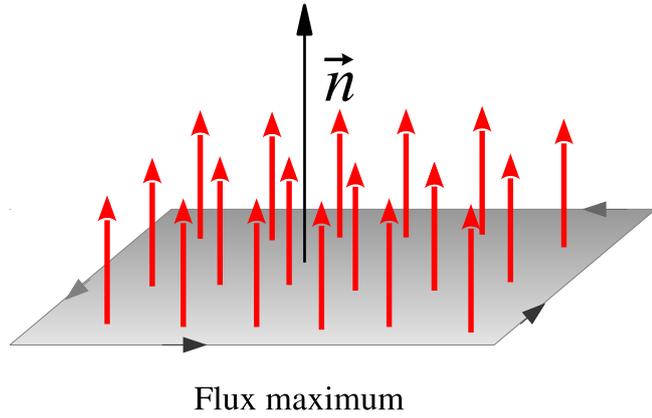
$$\phi = \iint_S \vec{B} \cdot dS \vec{n} = \vec{B} \cdot \left[\iint_S dS \right] \vec{n} = \vec{B} \cdot S \vec{n}$$

où $S = ab$ représente l'aire de la surface délimitée par la spire.

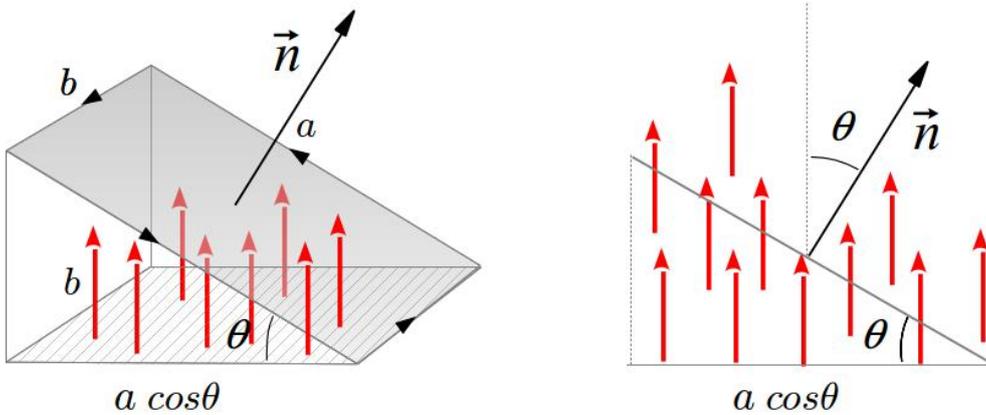
Sur les schémas qui suivent, les flèches rouges représentent le champ magnétique.

Le flux de \vec{B} est maximum lorsque \vec{B} et \vec{n} sont colinéaires et de même sens.

$$\phi = BS = Bab$$

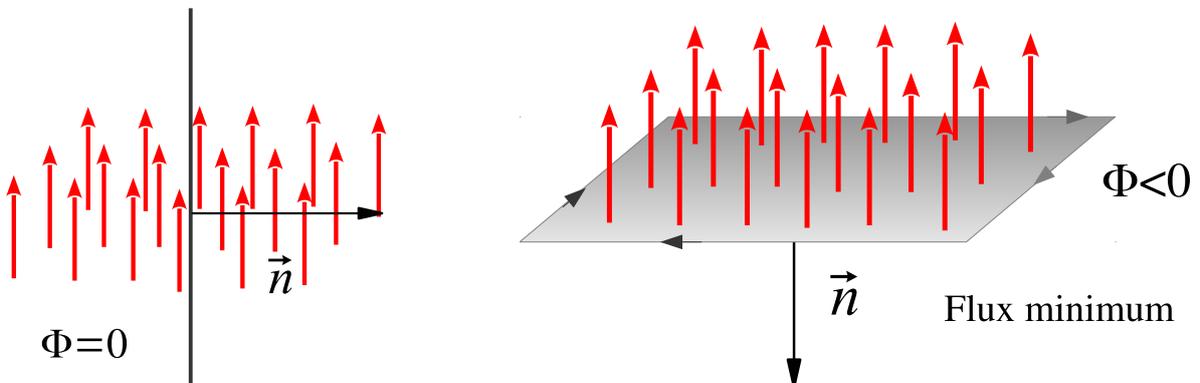


Le flux de \vec{B} diminue lorsque l'angle θ entre \vec{n} et \vec{B} augmente.



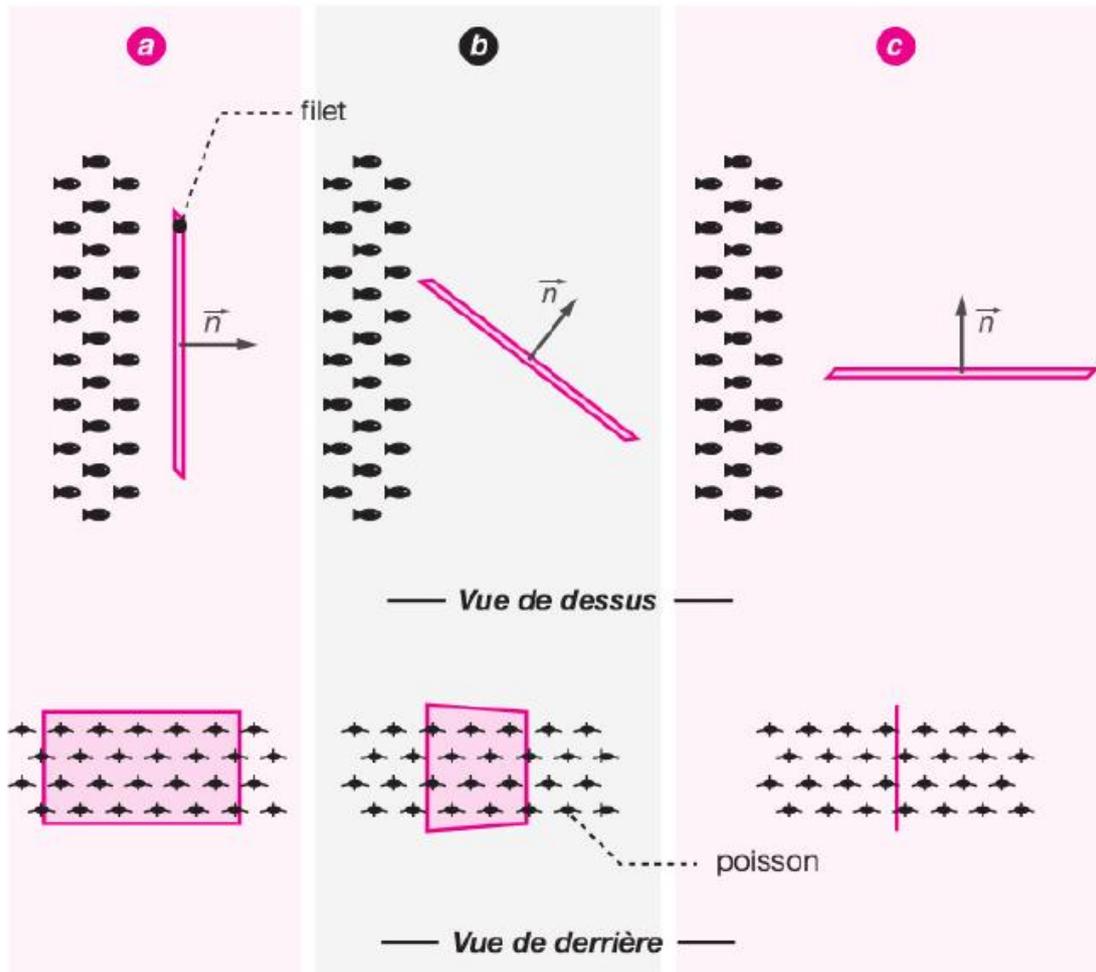
$$\phi = \vec{B} \cdot S\vec{n} = BS \cos \theta = Bab \cos \theta$$

Pour $\theta \in [0, \frac{\pi}{2}]$, on peut interpréter le terme $BS \cos \theta$ comme le flux de \vec{B} à travers la surface hachurée qui correspond à la projection de la surface S dans un plan perpendiculaire à la direction de \vec{B} (dont l'aire vaut $ab \cos \theta$).



Le flux s'annule pour $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$ ($\vec{B} \perp \vec{n}$), puis devient négatif pour $\theta \in [\frac{\pi}{2}, \pi]$. Il est minimum et vaut $\phi = -BS = -Bab$ lorsque \vec{B} et \vec{n} sont de sens opposés.

II.3. Équivalent aquatique du flux



Analogie du flux magnétique à travers une surface avec un flux de poissons à travers un cadre. Le plan du cadre est

- (a) perpendiculaire au déplacement des poissons
- (b) placé dans une configuration quelconque
- (c) parallèle au déplacement des poissons

III. Lois de l'induction

III.1. Le phénomène d'induction

Il apparaît des **courants induits** dans un circuit lorsque :

- ▷ le circuit est fixe dans un champ magnétique \vec{B} variable.
- ▷ le circuit est mobile dans un champ magnétique \vec{B} stationnaire.
- ▷ le circuit est mobile dans un champ magnétique \vec{B} variable (cas général).

La circulation du courant est liée à l'apparition dans le circuit d'une **force électromotrice** e , homogène à une tension, appelée **force électromotrice induite**.

Soit \vec{F} la force qui fait circuler une charge mobile q dans un circuit filiforme \mathcal{C} . La **force électromotrice** e est définie par :

$$qe = \oint_{\mathcal{C}} \vec{F} \cdot d\vec{\ell}$$

qe est l'énergie transmise à la charge q pour un tour de circuit.

La **force électromotrice** e est homogène à une tension et se mesure en volt.

III.2. Loi de Faraday

L'apparition d'une **force électromotrice** e est liée à la variation du **flux ϕ du champ magnétique** à travers le circuit. Le calcul du flux impose une orientation préalable du circuit.

- ▷ on oriente le circuit
- ▷ on en déduit l'orientation de la normale au circuit
- ▷ on calcule ensuite le flux ϕ du champ magnétique.

La force électromotrice e , dite **force électromotrice induite** vérifie la loi de Faraday :

$$e = -\frac{d\phi}{dt}$$

Le sens d'orientation de la fem e coïncide avec le sens d'orientation choisi pour le circuit. Il détermine le signe de ϕ .

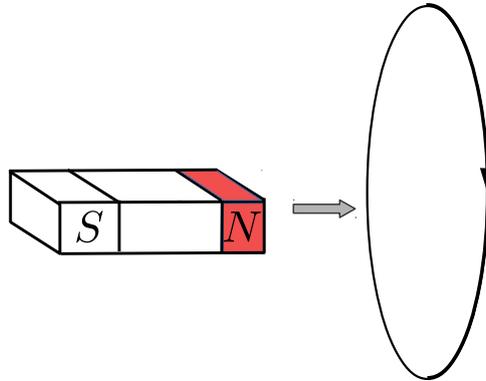
III.3. Loi de Lenz

Les courants induits s'opposent, par leurs effets, à la cause qui leur a donné naissance.

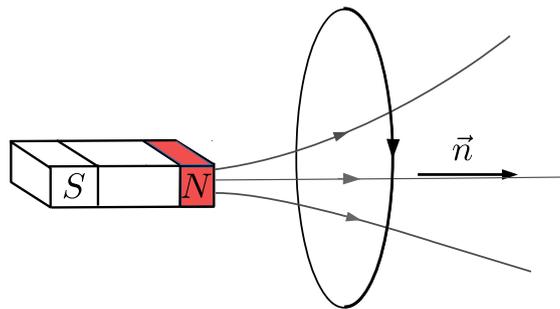
III.4. Exemple

On approche un aimant d'une spire de résistance totale R . Faire le schéma électrique équivalent de la spire. Donner l'expression de l'intensité des courants induits (dans le sens d'orientation de la figure).

Vérifier la cohérence du résultat obtenu.



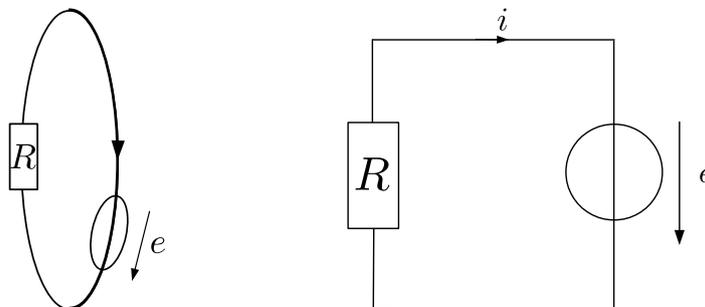
On déduit l'orientation de \vec{n} , normale à la surface délimitée par la spire, de l'orientation du circuit par la règle de la main droite.



Les lignes de champ magnétique quittent le pôle Nord : elles sont donc orientées vers la droite. On a donc $\phi > 0$. Si on approche l'aimant de la spire $\phi \nearrow$, $\frac{d\phi}{dt} > 0$, $e = -\frac{d\phi}{dt} < 0$.

On trace le schéma équivalent du circuit :

- la force électromotrice induite est orientée dans le sens d'orientation choisi pour le circuit.
- R représente la résistance totale de la spire.
- on oriente i dans le même sens que le circuit.



On a, d'après la loi des mailles :

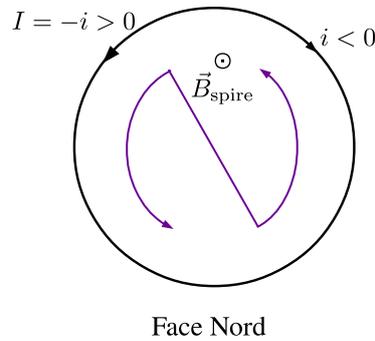
$$e = Ri$$

$$e = -\frac{d\phi}{dt} = Ri$$

$$i = -\frac{1}{R} \frac{d\phi}{dt}$$

On vérifie la cohérence du résultat :

Si on approche l'aimant, $\frac{d\phi}{dt} > 0$, $i < 0$: la spire crée un champ magnétique de sens opposé au celui de l'aimant. La spire est vue de l'aimant comme un pôle Nord qui s'oppose donc à l'approche du pôle Nord de l'aimant.



Lois de l'induction	
Flux d'un champ magnétique à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté	Évaluer le flux d'un champ magnétique uniforme à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté plan.
Loi de Faraday Courant induit par le déplacement relatif d'une boucle conductrice par rapport à un aimant ou un circuit inducteur. Sens du courant induit	Décrire, mettre en œuvre et interpréter des expériences illustrant les lois de Lenz et de Faraday.
Loi de modération de Lenz	Utiliser la loi de Lenz pour prédire ou interpréter les phénomènes physiques observés.
Force électromotrice induite, loi de Faraday	Utiliser la loi de Faraday en précisant les conventions d'algébrisation.

Autre vidéo à consulter sur le thème l'induction :

Ampère et l'histoire de l'électricité :

<https://www.youtube.com/watch?v=4XR6pLJrhaI&list=FL7jLNwly02h-R-OQX1dMUJA&feature=share&index=4>