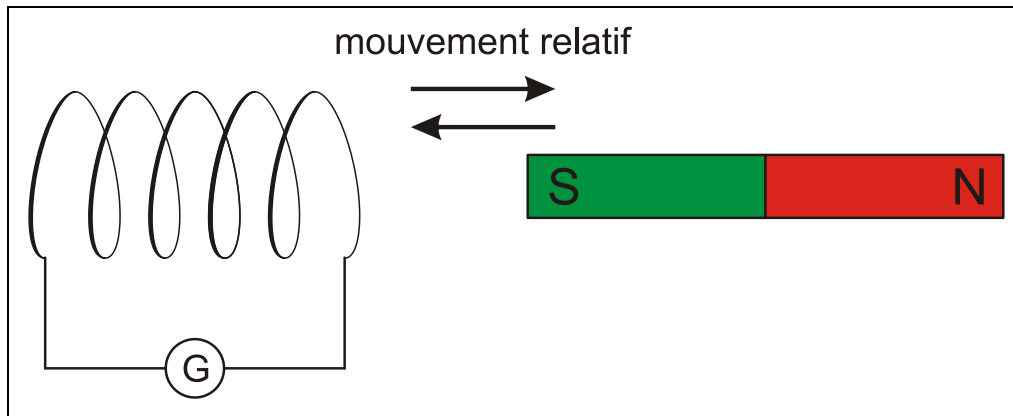


Chapitre 3: Induction électromagnétique

1. Mise en évidence du phénomène : expériences fondamentales

a) Expérience 1



1. Introduisons un aimant dans une bobine connectée à un galvanomètre (= ampèremètre sensible à cadre mobile, dont l'aiguille dévie soit vers la droite soit vers la gauche selon le sens du courant).
Observation : Un courant circule dans la bobine pendant la durée du mouvement de l'aimant.
2. Retirons l'aimant.
Observation : Le courant circule dans le sens opposé.
3. Maintenons l'aimant immobile dans la bobine.
Observation : Rien ne se passe.
4. Maintenons l'aimant fixe et approchons la bobine.
Observation : comme sub 1.
5. Maintenons l'aimant toujours immobile, et éloignons la bobine.
Observation : comme sub 2.

b) Terminologie

Le phénomène observé s'appelle **induction électromagnétique**.

Le courant observé s'appelle **courant induit**. Son intensité, généralement variable dans le temps, est notée "i".

La bobine dans laquelle le courant induit circule est la **bobine induite**.

De même que tout courant est dû à une tension, le courant induit est dû à une tension induite appelée **force électromotrice induite** ou **f. é. m. induite**. On la note "e".

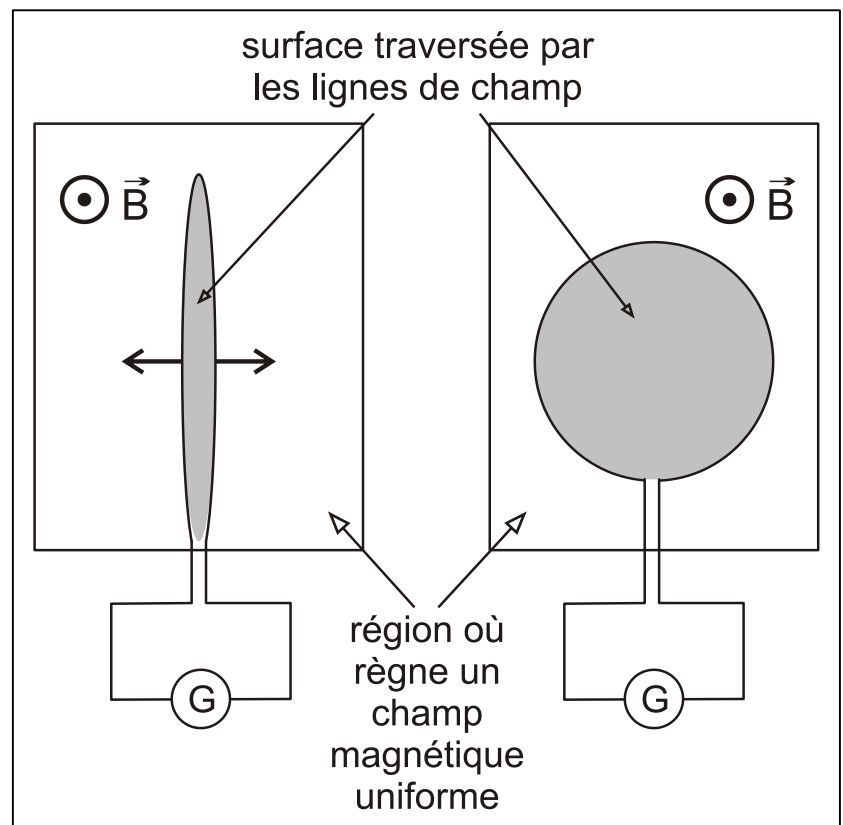
c) Expérience 2

1. On place une boucle formée par un fil conducteur et reliée à un galvanomètre dans le champ magnétique d'un aimant en U. Initialement la boucle est aplatie de sorte que la surface traversée par les lignes de champ est faible. Etirons cette boucle pour que la surface traversée par les lignes de champ s'agrandisse.

Observation : Un courant induit circule dans la boucle pendant la durée où la boucle s'agrandit.

2. Comprimons la boucle afin de réduire la surface traversée par les lignes de champ.

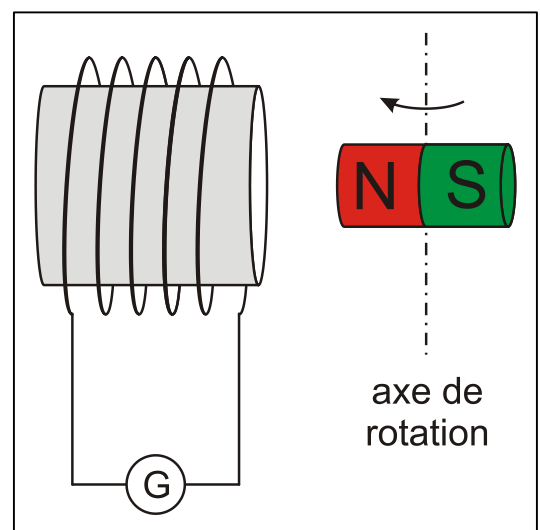
Observation : Le courant induit circule dans le sens opposé.

**d) Expérience 3**

Plaçons un aimant horizontal, mobile autour d'un axe vertical, près d'une bobine d'axe horizontal, connectée à un galvanomètre. Faisons tourner cet aimant à vitesse angulaire constante.

Observation : Un courant induit circule dans la bobine dans un sens, puis dans l'autre, puis de nouveau dans le premier sens, et ainsi de suite : la bobine est parcourue par un courant alternatif de fréquence égale à celle du mouvement de rotation.

On fait la même observation si l'aimant est fixe et que la bobine tourne à vitesse angulaire constante.



e) Conclusion

On observe l'apparition d'un courant induit dans un circuit fermé si :

- 1) l'intensité ou la direction d'un champ magnétique à travers ce circuit **varie** ;
- 2) la surface délimitée par le circuit traversé par le champ **varie**.

Si le circuit est ouvert une f. é. m. (tension) apparaît aux bornes du circuit.

2. Flux magnétique

a) Notion intuitive

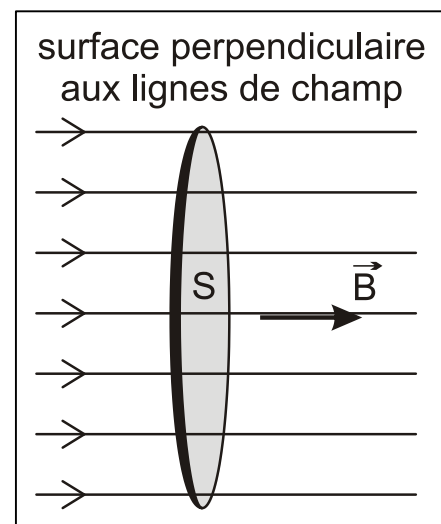
La conclusion précédente nous suggère que le phénomène de l'induction électromagnétique se manifeste dans un circuit **dès que le nombre de lignes de champ à travers ce circuit varie**.

Les physiciens ont défini une grandeur physique appelée flux magnétique Φ qui est justement une mesure du nombre de lignes de champ passant à travers un circuit.

Comme B est une mesure de la densité des lignes de champ, Φ est proportionnel à B et à S .

Si la surface S est disposée perpendiculairement aux lignes de champ, alors $\Phi = BS$ (constante de proportionnalité égale à 1, ce qui définit l'unité de Φ).

Si la surface n'est pas perpendiculaire aux lignes de champ, alors $\Phi < BS$! Afin d'exprimer ce flux, les physiciens définissent le vecteur surface $\vec{S}$.

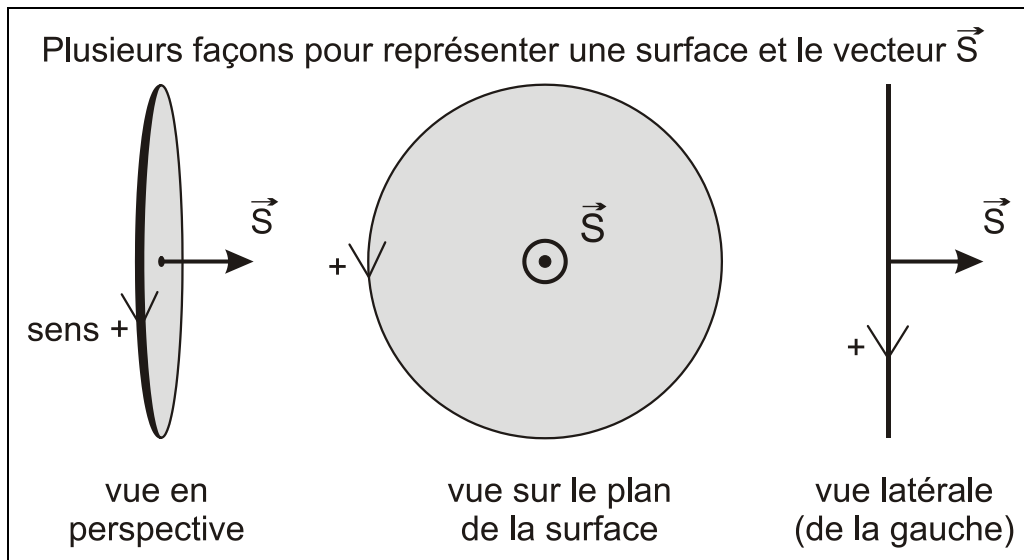


b) Définition du vecteur surface

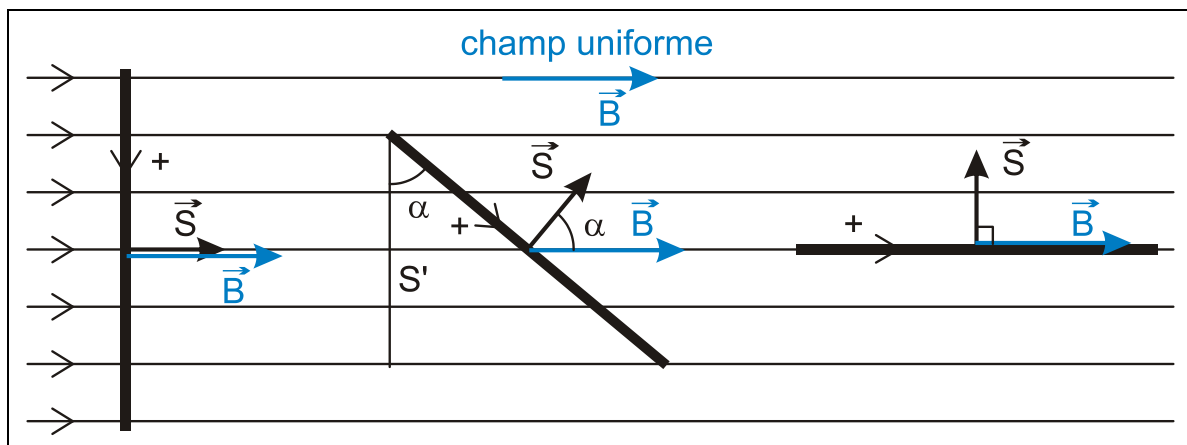
Tout d'abord on choisit un sens positif pour le contour de la surface.

Les caractéristiques du vecteur surface $\vec{S}$ sont :

- * point d'application : le centre de la surface
- * direction : perpendiculaire à la surface
- * sens : déterminé par la règle de la main droite : les doigts courbés indiquent le sens + et le pouce indique le sens de $\vec{S}$
- * norme : la valeur S de la surface (en m^2)



c) Définition du flux magnétique



1. $\vec{S}$ parallèle à $\vec{B}$: $\Phi = BS$
2. Angle α quelconque entre $\vec{S}$ et $\vec{B}$: Φ à travers $S = \Phi$ à travers $S' = BS' = BS \cos \alpha = \vec{B} \cdot \vec{S}$
3. $\vec{S}$ perpendiculaire à $\vec{B}$: $\Phi = 0$ car aucune ligne de champ ne traverse S !

On voit aisément que la relation trouvée sub 2 vaut aussi dans les cas 1 et 3.

Finalement, le flux d'un champ magnétique $\vec{B}$ à travers une surface $\vec{S}$ est défini par le produit scalaire de $\vec{B}$ par $\vec{S}$:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cos \alpha$$

Si la surface est délimitée par un circuit bobiné comportant N spires, la surface totale vaut N fois la surface d'une spire, et :

$$\Phi = N \vec{B} \cdot \vec{S} = NBS \cos \alpha$$

($\vec{S}$ est toujours le vecteur surface d'une seule spire !)

d) Unité S.I. : le weber (Wb)

$\vec{S}$ parallèle à $\vec{B}$: $\Phi = BS$

Si $B = 1 \text{ T}$ et $S = 1 \text{ m}^2$ alors $\Phi = 1 \text{ Tm}^2 = 1 \text{ weber} = 1 \text{ Wb}$

$1 \text{ mWb} = 10^{-3} \text{ Wb}$ etc.

e) Apparition du phénomène de l'induction électromagnétique [Conclusion 1. e)]

Le phénomène de l'induction électromagnétique apparaît dans un circuit électrique si **le flux magnétique à travers ce circuit varie !**

Si le circuit est ouvert le phénomène se manifeste par une f.é.m. apparaissant aux bornes du circuit. Si le circuit est fermé, il se manifeste par un courant induit circulant dans le circuit.

3. Sens du courant induit: Loi de Lenz**a) Reprenons l'expérience 1**

Introduisons un pôle Sud dans la bobine et déterminons le sens du courant induit. Bien entendu ce courant à travers la bobine engendre un champ magnétique qui va se superposer au champ de l'aimant. Afin de ne pas confondre ces champs il convient de soigner la terminologie:

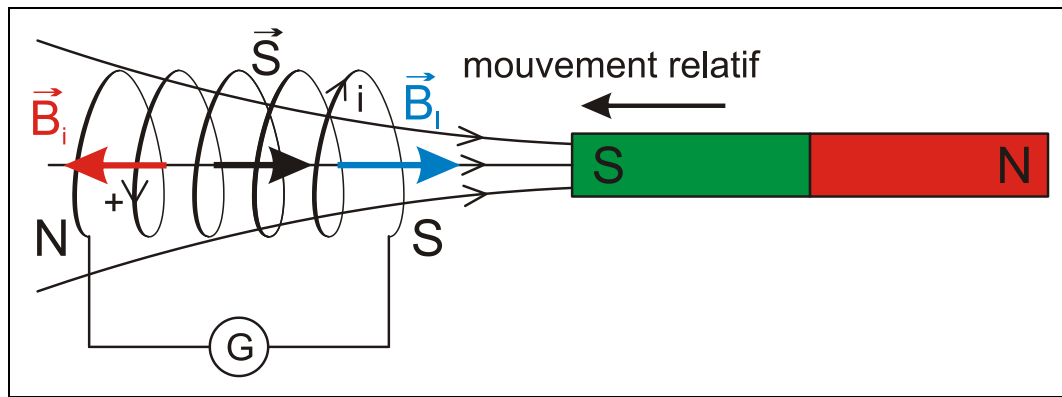
- * L'aimant est le **système inducteur**, celui qui provoque une variation de flux dans la bobine.

Son champ s'appelle **champ inducteur** $\vec{B}_1$; son flux qu'il envoie à travers n'importe quelle surface s'appelle **flux inducteur**.

- * La bobine, à travers laquelle le flux inducteur varie et qui est donc parcourue par un **courant induit**, s'appelle **bobine induite**. Le champ créé par le courant induit s'appelle **champ induit** $\vec{B}_i$, le flux que ce champ envoie à travers n'importe quelle surface, **flux induit**.

Conformément à cette terminologie nous dirons :

En approchant le pôle Sud, le flux inducteur à travers la bobine induite augmente (compte tenu du sens positif choisi !). Cette variation positive du flux inducteur donne naissance à un courant induit d'intensité i .



Observations :

i circule dans le sens opposé au sens positif choisi

i circule dans un sens tel que :

la bobine présente une face Sud au pôle Sud en train de s'approcher (bobine et aimant se repoussent !) ;

le champ induit $\vec{B}_i$ est opposé au champ inducteur $\vec{B}_l$ en train d'augmenter ;

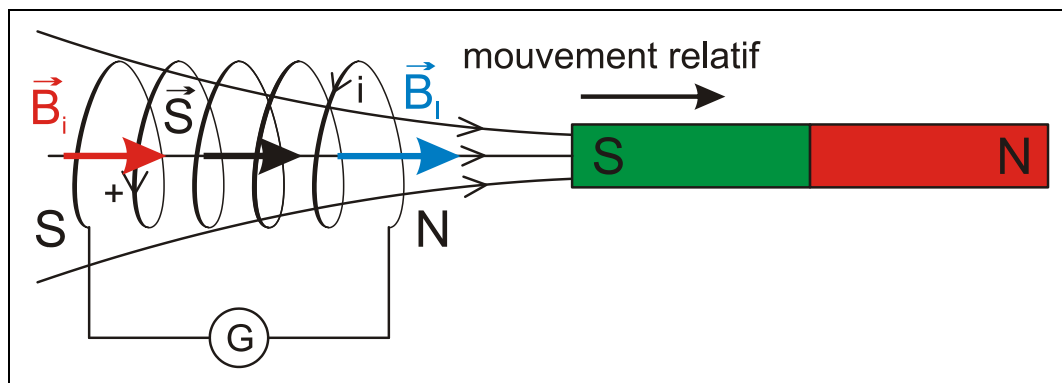
le flux induit à travers la bobine induite (négatif !) est de signe opposé à celui de la variation du flux inducteur (positive !).

Remarque : Choisissons le sens contraire comme sens positif

Le flux inducteur diminue lorsqu'on approche le pôle Sud. i circule dans le sens positif.

Bobine et aimant se repoussent. Champ induit et champ inducteur sont de sens contraire. Le flux induit à travers la bobine induite (positif !) est de signe opposé à celui de la variation du flux inducteur (négative !).

En éloignant le pôle Sud, le flux inducteur à travers la bobine induite diminue (compte tenu du sens positif choisi !)



Observations :

i circule dans le sens positif

i circule dans un sens tel que :

la bobine présente une face Nord à l'aimant en train de s'éloigner (bobine et aimant s'attirent) ;

le champ induit $\vec{B}_i$ est de même sens que le champ inducteur $\vec{B}_l$ en train de diminuer ;

le flux induit à travers la bobine induite (positif !) est de signe opposé à celui de la variation du flux inducteur (négative !).

b) Loi de Lenz

Généralisons les résultats de l'expérience précédente !

Le courant induit circule dans un sens tel qu'il tente de s'opposer à la cause qui lui donne naissance.

Cette cause est évidemment la variation du flux inducteur. Donc :

Le courant induit circule dans un sens tel qu'il tente de s'opposer à la variation du flux inducteur qui lui donne naissance.

c) D'où provient l'énergie électrique induite dans l'expérience 1 ?

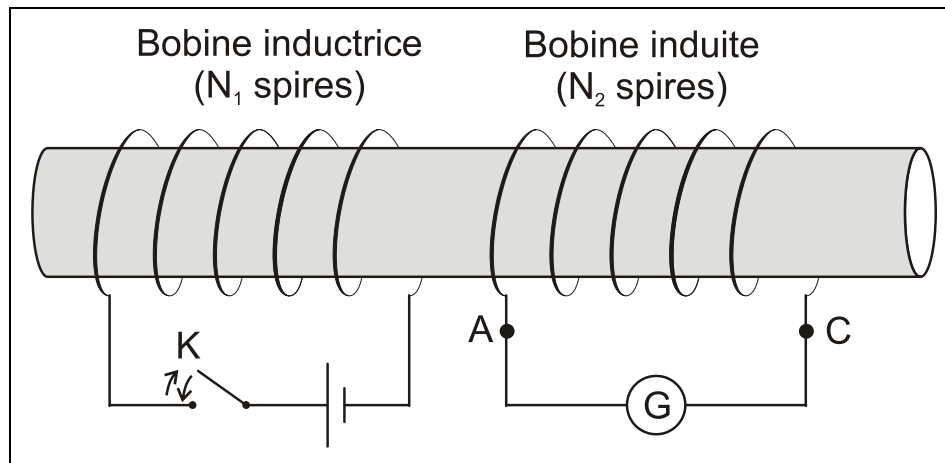
- * La bobine présente une face S au pôle S de l'aimant lorsqu'on l'introduit dans la bobine : il faut donc vaincre cette force de répulsion.
- * La bobine présente une face N au pôle S de l'aimant lorsqu'on le retire de la bobine : il faut donc vaincre cette force d'attraction.

C'est le travail de ces forces mécaniques qu'un dispositif extérieur doit fournir (opérateur, moteur,...) qui est transformé en énergie électrique.

d) Application de la loi de Lenz pour trouver le sens du courant induit

Trouver le sens du courant induit lorsqu'on ferme l'interrupteur K, et lorsqu'on ouvre K.

Trouver la polarité des points A et C !



On ferme K :

- Méthode :
1. Le champ inducteur augmente. Le champ induit est donc opposé au champ inducteur. On représente ces champs sur la figure.
 2. À partir sens du champ induit, trouver le sens du courant induit !
 3. Sachant que le courant circule à l'extérieur d'un générateur (= bobine induite) du pôle + vers le pôle -, on trouve aisément la polarité des bornes de la bobine induite.

On ouvre K : même méthode.

Attention : Le champ inducteur diminue rapidement. Le champ induit est donc de même sens que le champ inducteur.

e) Forme mathématique de la loi de Lenz

Convention : signes de l'intensité i d'un courant et de la f.é.m. e qui le crée

Courant circulant dans le sens positif $\Leftrightarrow i > 0 \Leftrightarrow e > 0$

Courant circulant dans le sens négatif $\Leftrightarrow i < 0 \Leftrightarrow e < 0$

En tenant compte de ces conventions et en notant la variation du flux inducteur $\Delta\Phi$:

Si $\Delta\Phi < 0$, alors $i > 0$ et $e > 0$

Si $\Delta\Phi > 0$, alors $i < 0$ et $e < 0$

4. Etude expérimentale de la f.é.m. induite

a) F.é.m. induite moyenne e_m et f.é.m. induite instantanée e

Pendant l'intervalle de temps Δt où le flux inducteur varie de $\Delta\Phi$, la bobine donne naissance à une f.é.m. induite dont la **valeur instantanée e** varie (en principe) au cours de l'intervalle de temps. Souvent on ne s'intéresse qu'à la **valeur moyenne e_m au cours de l'intervalle de temps Δt** .

Dans l'étude expérimentale qui va suivre, nous mesurons la f.é.m. moyenne à l'aide d'un galvanomètre en admettant qu'elle soit proportionnelle à la déviation maximale de l'aiguille.

En plus, nous ne nous intéressons qu'aux valeurs absolues de $\Delta\Phi$ et de e_m .

(Nous savons que $\Delta\Phi$ et e_m sont de signe opposé !)

b) Facteurs influençant la f. é. m. induite moyenne $|e_m|$

C'est la variation de flux $|\Delta\Phi|$, ayant lieu au cours d'une durée Δt , qui est à l'origine de la f.é.m. induite. Les facteurs susceptibles d'influencer la f. é. m. moyenne $|e_m|$ au cours de la durée Δt sont donc ceux qui déterminent $|\Delta\Phi|$:

l'intensité B_I du champ magnétique inducteur

le nombre N de spires

la surface S délimitée par 1 spire et traversée par le champ magnétique inducteur

l'angle entre $\vec{B}_I$ et $\vec{S}$

En plus, nous allons étudier l'influence de la durée Δt sur la f.é.m. moyenne $|e_m|$.

(Rappel : lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur il faut maintenir les autres constants !)

c) Influence de l'intensité B_I du champ magnétique inducteur (expérience 4)

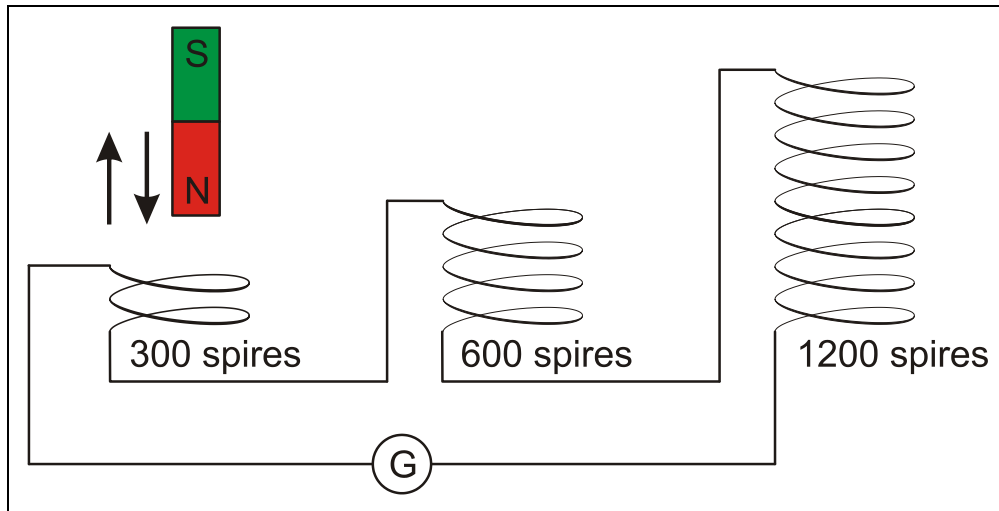
On reprend l'expérience 1, en introduisant, avec la même vitesse, un aimant faible, puis un aimant plus puissant dans la bobine induite. Nous mesurons la déviation maximale de l'aiguille, proportionnelle à la f.é.m. moyenne $|e_m|$.

Observation : Plus l'aimant est puissant, plus $|e_m|$ est élevé.

Conclusion 1 : $|e_m|$ est proportionnel à B_I .

d) Influence du nombre N de spires (expérience 5)

Trois bobines en série, de nombres de spires respectifs 300, 600 et 1200, sont connectées au galvanomètre. Introduisons successivement, avec la même vitesse, un aimant dans ces bobines. Nous mesurons chaque fois la déviation maximale de l'aiguille, proportionnelle à la f.é.m. moyenne $|e_m|$.

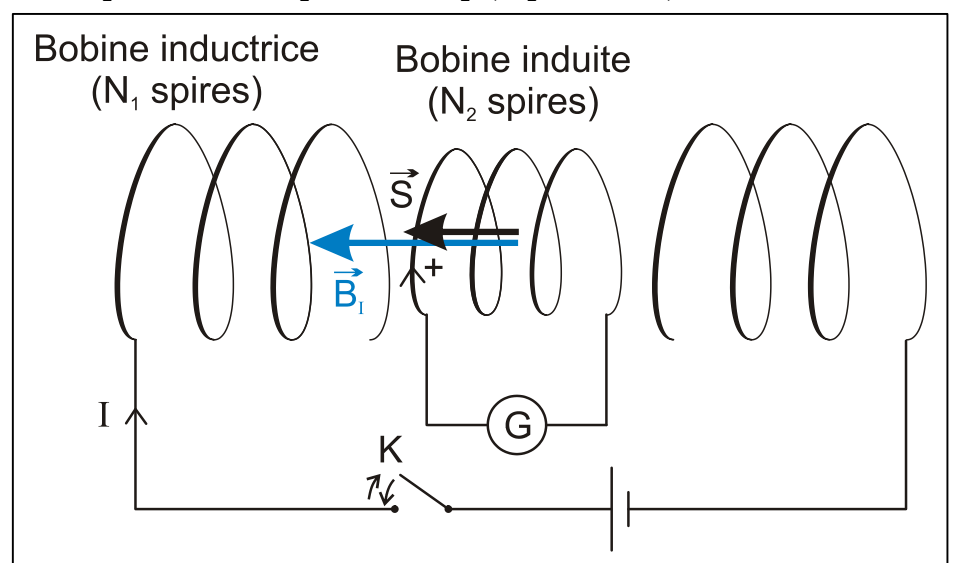


Observation : Pour 600 spires $|e_m|$ est 2 fois plus élevé que pour 300 spires; pour 1200 spires $|e_m|$ est 4 fois plus élevé que pour 300 spires.

Conclusion 2 : $|e_m|$ est proportionnel à N .

e) Influence de la surface S d'une spire traversée par le champ (expérience 6)

Deux bobines induites en série, de même nombre de spires, sont connectées à un galvanomètre. Pour l'une des bobines, la surface d'une spire vaut 14 cm^2 , pour l'autre, 28 cm^2 . On place successivement l'une, puis l'autre de ces bobines à l'intérieur d'un long solénoïde (bobine inductrice) connecté à un



accumulateur par l'intermédiaire d'un interrupteur. Lorsqu'on ferme ou qu'on ouvre l'interrupteur, le champ du solénoïde (champ inducteur) s'établit ou disparaît rapidement : il y

a donc des variations rapides du flux inducteur à travers la bobine induite qui sont à l'origine de f.é.m. induites. Nous mesurons la déviation maximale de l'aiguille, proportionnelle à la f.é.m. moyenne $|e_m|$.

Observation : Lorsque la bobine de 28 cm^2 de surface par spire se trouve à l'intérieur du solénoïde $|e_m|$ est 2 fois plus élevée que lorsque celle de 14 cm^2 s'y trouve.

Conclusion 3 : $|e_m|$ est proportionnel à S.

f) Influence de la durée Δt de variation du flux (expérience 7)

Reprenons l'expérience 1, et introduisons l'aimant lentement puis rapidement dans la bobine induite. Nous mesurons dans les deux cas la déviation maximale de l'aiguille, proportionnelle à la f.é.m. moyenne $|e_m|$.

Observation : Lorsqu'on introduit l'aimant lentement dans la bobine, $|e_m|$ est plus faible que si on l'introduit rapidement.

Une expérience plus sophistiquée montrerait que si la durée de variation du flux Δt est 2 fois plus grande, $|e_m|$ est deux fois plus faible.

Conclusion 4 : $|e_m|$ est inversement proportionnel à Δt .

g) Conclusion générale

Conclusions 1, 2 et 3 $\Rightarrow |e_m|$ est proportionnel à la variation du flux inducteur $|\Delta\Phi|$.

Conclusion 4 : $|e_m|$ est inversement proportionnel à Δt

Finalement : $|e_m|$ est proportionnel à $\left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| \Leftrightarrow |e_m| = k \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|$

Dans le système d'unités S.I., la constante de proportionnalité k est égale à 1 !

En tenant compte de la Loi de Lenz (e_m et $\Delta\Phi$ de signe opposé) on aboutit finalement à la loi de Faraday !

h) Loi de Faraday

La f.é.m. induite moyenne dans un circuit est égale à l'opposé de la variation du flux inducteur à travers ce circuit par unité de temps.

$$e_m = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

La f.é.m. instantanée à un instant t est la f. é. m. moyenne au cours d'un intervalle de temps très petit englobant t .

$$e = - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = - \frac{d\Phi}{dt}$$

La f.é.m. induite (instantanée) dans un circuit est égale à l'opposé de la dérivée par rapport au temps du flux inducteur à travers ce circuit.

Rappel: La dérivée par rapport au temps d'une grandeur quelconque représente la vitesse de variation de cette grandeur.

$\frac{d\Phi}{dt}$ est donc une mesure de la **vitesse de variation du flux inducteur** !

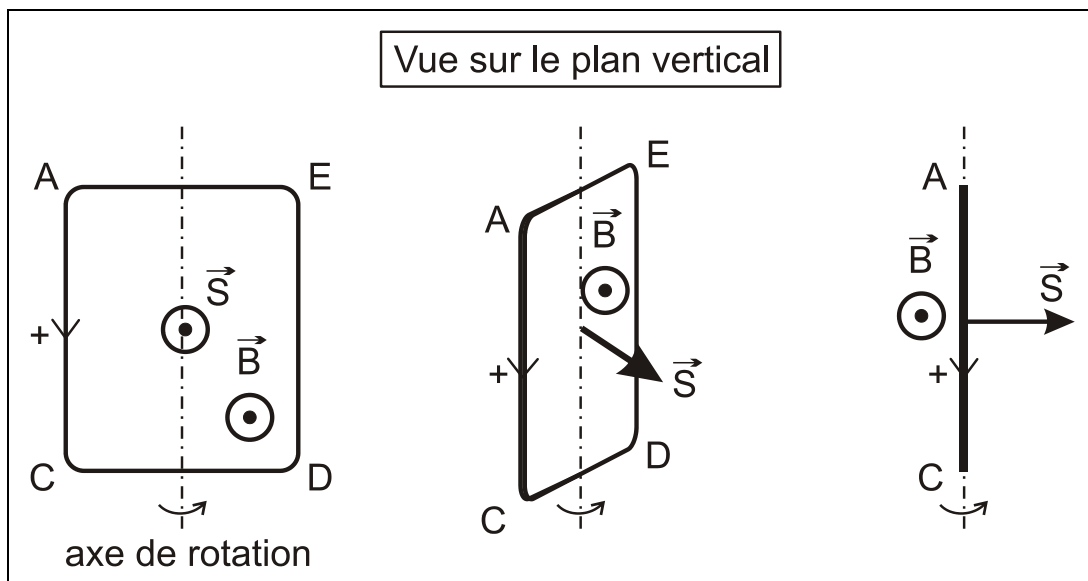
Plus le flux inducteur varie vite, plus la f.é.m. induite sera importante !

5. Applications

a) L'alternateur

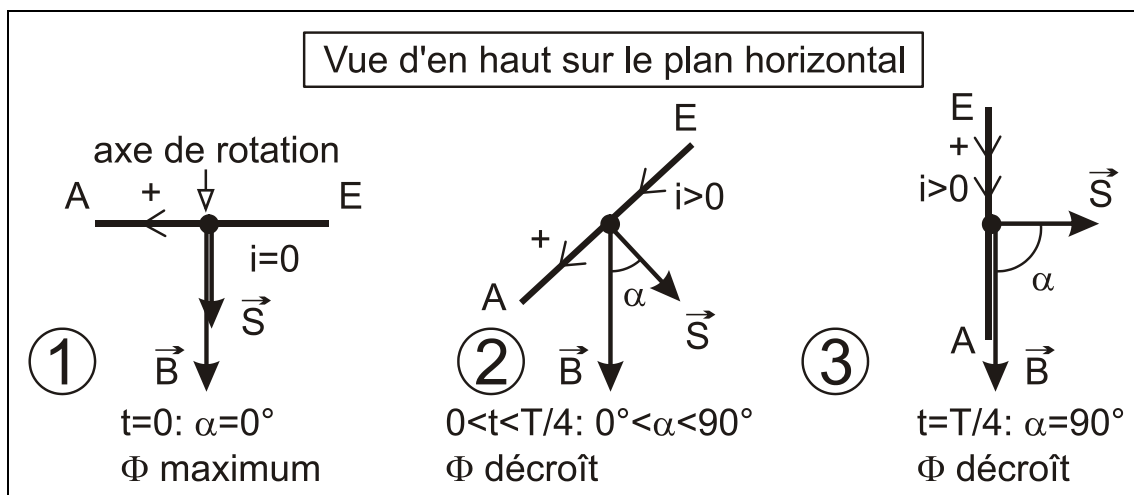
Une bobine ayant N spires, tourne à vitesse angulaire constante dans un champ magnétique (supposé uniforme). Une f. é. m. alternative sinusoïdale de même fréquence que la fréquence de rotation est induite dans la bobine. Si le circuit est fermé un courant alternatif sinusoïdal de même fréquence circule dans le circuit.

Afin de comprendre le fonctionnement de l'alternateur on considère tout d'abord une seule spire rectangulaire tournant à vitesse angulaire ω constante dans un champ magnétique inducteur uniforme $\vec{B}$. Les figures illustrent que le flux inducteur varie en fonction du temps.

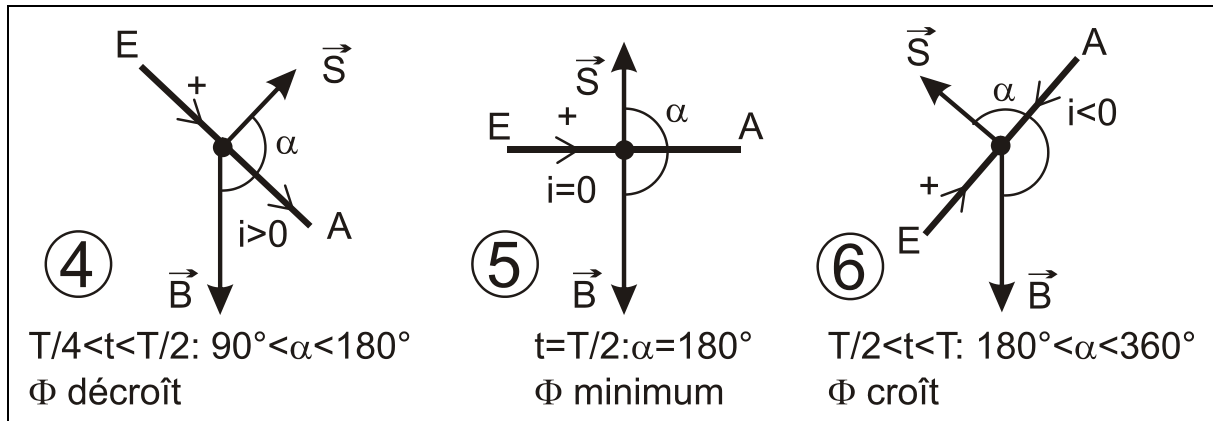


Analysons comment varie le flux inducteur Φ à différents instants !

Pour cela regardons d'en haut sur le cadre tournant : $\vec{B}$ et $\vec{S}$ apparaissent alors dans le plan de la figure ! La période de rotation est notée T .



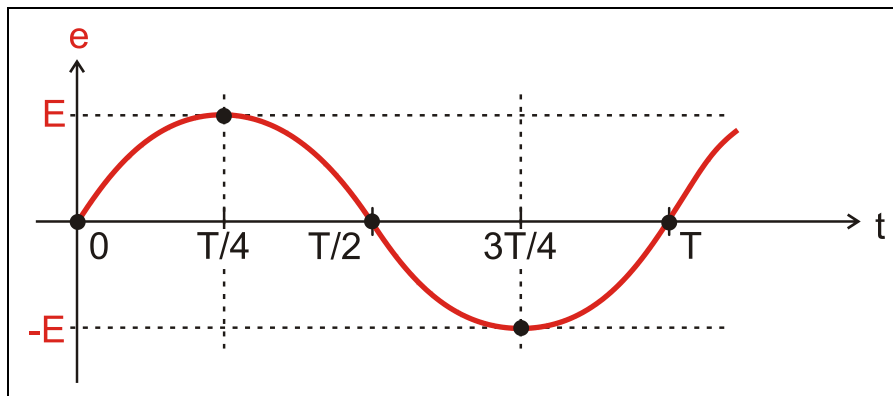
Appliquons la loi de Lenz :
 si Φ augmente alors e et i sont négatifs
 si Φ diminue alors e et i sont positifs
 si Φ ne varie pas (extremum) alors e et i sont nuls



Expression mathématique de la f.é.m. induite

On peut montrer que la f.é.m. produite par l'alternateur s'écrit : $e = NBS\omega \sin \omega t = E \sin \omega t$

La f.é.m. e est alternative et sinusoïdale d'amplitude E .



Remarque

Un voltmètre indique la f.é.m. **efficace** $E_{\text{eff}} = \frac{E}{\sqrt{2}}$ (moyenne de e^2 dans le temps).

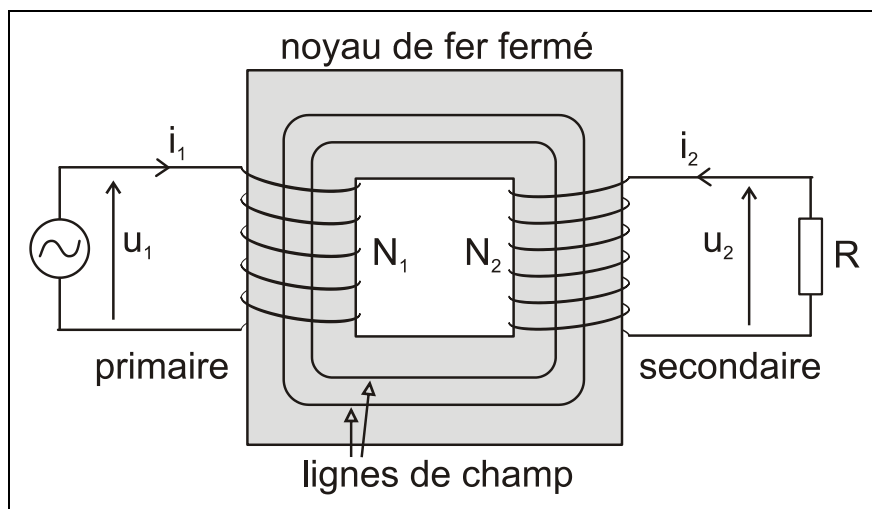
Exemple

Tension alternative 220 V, 50 Hz : La tension efficace est de 220 V ! L'amplitude est donc de $220 \cdot \sqrt{2} \text{ V} = 316 \text{ V}$. La tension instantanée varie entre +316 V et -316 V. La période est $T = 1/50 \text{ s}$.

b) Le transformateur

Deux bobines appelées **primaire** et **secondaire** sont reliées par un noyau de fer fermé. Ainsi à tout instant, le champ magnétique à travers chaque spire du primaire et chaque spire du secondaire est le même : on dit que **le fer canalise les lignes de champ**.

Le primaire (inducteur) est branché sur un générateur de tension alternative de tensions u_1 : il est parcouru par un courant alternatif d'intensité i_1 produisant dans le fer un champ magnétique alternatif : $\vec{B}_1$ s'établit dans un sens, puis disparaît pour s'établir dans l'autre sens, puis s'établit de nouveau dans le premier sens, etc. Le champ inducteur alternatif envoie un flux inducteur alternatif à travers le secondaire (induit) : une f.é.m. induite alternative y prend naissance. Lorsqu'on branche le secondaire sur une résistance R , il est parcouru par un courant alternatif d'intensité i_2 et une tension alternative u_2 règne à ses bornes.



Remarques

u_1, i_1, u_2, i_2 sont les grandeurs instantanées (alternatives sinusoïdales).

Les amplitudes (valeurs maximales) sont notées $U_{1m}, I_{1m}, U_{2m}, I_{2m}$.

Les valeurs efficaces sont notées U_1, I_1, U_2, I_2 : ce sont les valeurs indiquées par des instruments de mesure (voltmètre, ampèremètre).

Les valeurs efficaces sont reliées aux amplitudes par les relations : $U_1 = \frac{U_{1m}}{\sqrt{2}}, I_1 = \frac{I_{1m}}{\sqrt{2}}$, etc.

Relations pour le transformateur parfait (sans pertes d'énergie) :

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$P_1 = P_2$$

(P est la puissance électrique reçue ou fournie)