

MAG 3



Lois de l'induction

« **Lois de l'induction** » repose sur la loi de Faraday qui se prête parfaitement à une introduction expérimentale et qui constitue un bel exemple d'illustration de l'histoire des sciences. On évoque, à ce sujet, les différents points de vue possibles sur le même phénomène selon le référentiel dans lequel on se place.

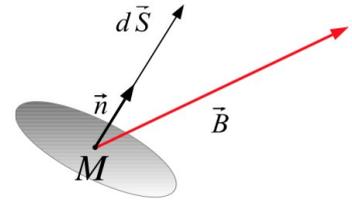
Notions et contenu	Capacités exigibles
Lois de l'induction	
Flux d'un champ magnétique. Flux d'un champ magnétique à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté.	Évaluer le flux d'un champ magnétique uniforme à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté plan.
Loi de Faraday. 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.

I. FLUX D'UN CHAMP VECTORIEL

I-1. Flux élémentaire

On considère une surface élémentaire dS au voisinage du point M .

Soit \vec{n} un vecteur normal à cette surface en son centre.



Le choix du sens de \vec{n} définit l'orientation de la surface (règle du tire bouchon ou de la main droite).

On définit alors le vecteur surface élémentaire : $\vec{dS} = dS \vec{n}$.

Le flux du champ magnétique à travers la surface orientée est défini par : $d\Phi = \vec{B}_{(M)} \cdot \vec{dS}$.
(produit scalaire). L'unité de flux est le weber (W): $1 \text{ W} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2$.

Le flux du champ magnétique est une **grandeur algébrique**, son signe dépend de l'orientation choisie pour la surface.

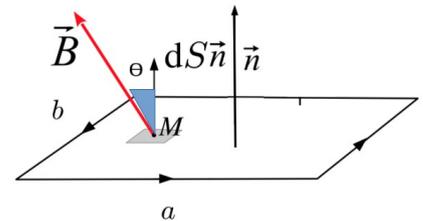
C'est une mesure du nombre de lignes de champ passant à travers un circuit.

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

On considère une spire rectangulaire, de côté 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.

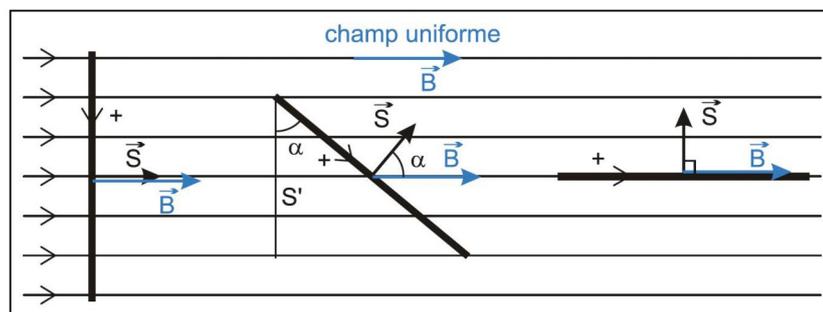
$$\Phi = \iint d\Phi = \vec{B}_{(M)} \cdot \iint \vec{dS} \text{ si } \vec{B} \text{ est uniforme.}$$

$$\Phi = \vec{B}_{(M)} \cdot \vec{S}$$



Dans le cas de l'exemple: $\Phi = B ab \cos \Theta$ (aire du rectangle: $S = ab$)

Le flux s'annule pour $\theta = \pm \pi/2$ ($\vec{B}_{(M)}$ et \vec{n} sont alors perpendiculaires), est positif pour $\theta \in [0, \pi/2]$ et négatif pour $\theta \in [\pi/2, \pi]$. Il est minimum et vaut $-BS$ lorsque $\vec{B}_{(M)}$ et \vec{n} sont de sens opposés.



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 !

Pour un enroulement de N spires, le flux est le produit du flux du champ magnétique à travers une spire par le nombre de spires

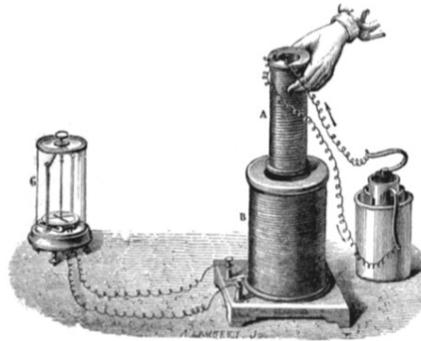
$$\Phi_{\text{tot}} = N \Phi_s.$$



II LOI DE FARADAY

II-1. Différentes manifestations de l'induction électromagnétique

Michael Faraday est l'un des pères fondateurs de l'électromagnétisme. L'une des expériences les plus importantes qu'il réalisa en 1831 introduit la compréhension des phénomènes d'induction électromagnétique. Connaissant la capacité des courants électriques à produire des champs magnétiques, Faraday se posa la question réciproque : un champ magnétique peut-il être à l'origine de la production de courants ?



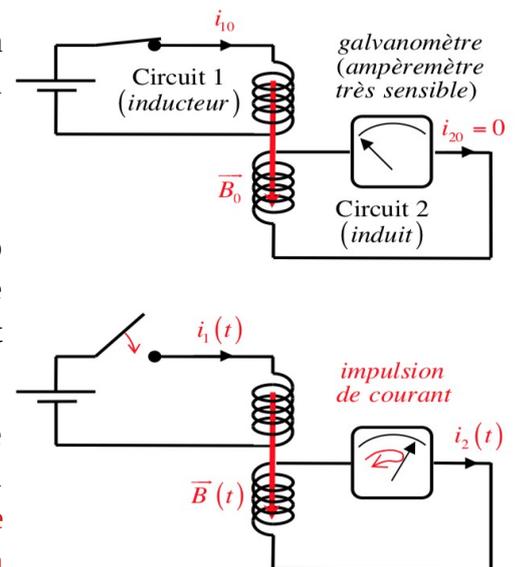
Expériences historiques de Faraday

Expérience 1:

Il disposa deux bobines sur un même manchon, en position coaxiale, de telle sorte que le champ magnétique créé par la première s'exerce au cœur de la seconde.

Constatation:

- lorsque le courant est établi dans le circuit 1, le champ magnétique permanent ainsi créé ne produit pas de courant dans le circuit 2. Faraday s'en assure en utilisant un détecteur de courant de très grande sensibilité.
- Par contre, au moment de la fermeture du circuit 1, dans la phase transitoire où le champ magnétique est en train de s'établir, il apparaît une impulsion de courant dans le circuit 2 : **le phénomène électrique est dû non pas au champ magnétique, mais à la variation du champ magnétique.**

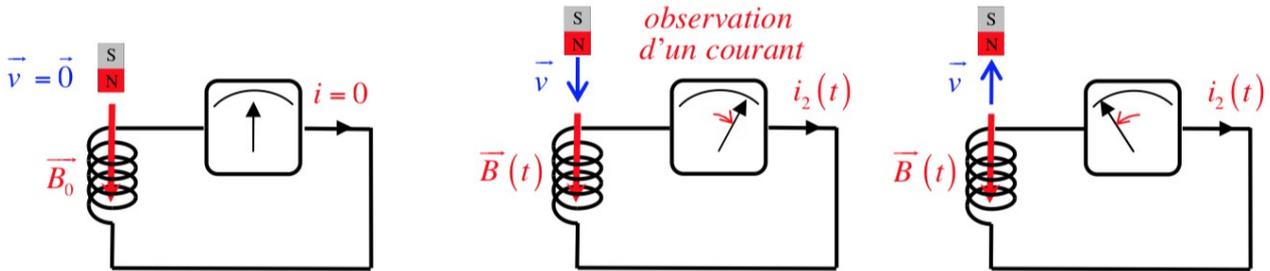


Faraday montre qu'une inversion du sens du courant inducteur (et donc aussi du sens du champ d'induction magnétique) provoque une inversion du sens de l'impulsion de courant dans le circuit 2.

Expérience 2: Approche d'un aimant dans l'axe d'une bobine <https://youtu.be/vwIdZjdd8fo>

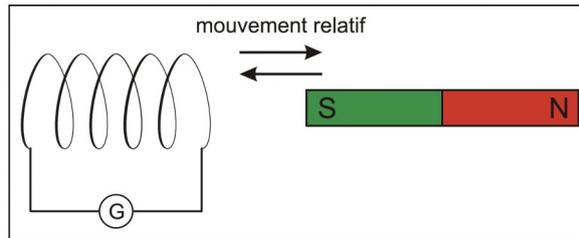
Faraday fit la même expérience en utilisant un aimant permanent en guise d'**inducteur** et observa les mêmes conclusions :

- Un aimant immobile n'induit aucun courant dans le circuit électrique
- L'approche d'un aimant crée un champ variable qui induit un courant dans le circuit électrique.



Le **changement du sens de la vitesse** provoque un changement du signe du courant et le **changement de la polarité de l'aimant** (changement de sens du champ magnétique inducteur) provoque également, un changement du signe du courant induit.

Conclusion :



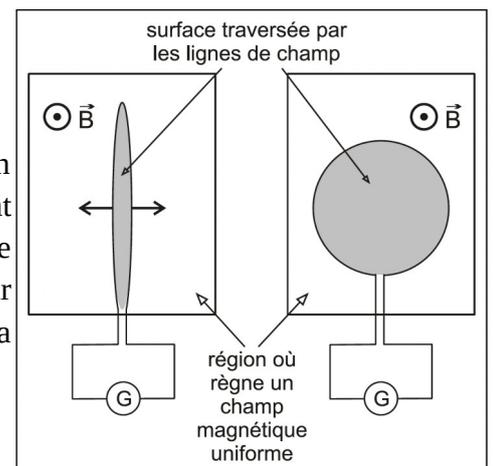
Il apparaît des courants induits dans un circuit lorsque :

- Le circuit est fixe dans un champ magnétique variable dans le temps. Lorsqu'un aimant droit se déplace par rapport à la bobine immobile, un courant induit circule dans le circuit.
- Le circuit est mobile dans un champ magnétique stationnaire (constant). Un courant induit apparaît lorsque la bobine se déplace dans un champ magnétique extérieur (aimant fixe).

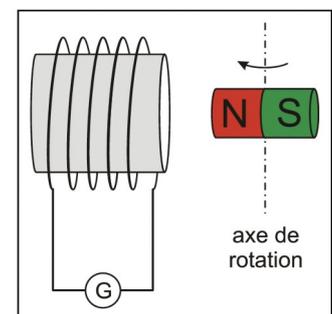
Mais aussi, lorsque:

- Le champ magnétique est constant et l'aire du circuit variable.

Le plan de la boucle est perpendiculaire aux lignes de champ, on observe un courant induit lorsque l'aire de la boucle varie. Initialement la boucle est aplatie de sorte que la surface traversée par les lignes de champ est faible. Étirons cette boucle pour que la surface traversée par les lignes de champ s'agrandisse. Un courant induit circule dans la boucle pendant la durée où la boucle s'agrandit.



- Le champ est constant et l'orientation de la boucle variable et vice versa.



Un courant induit apparaît lorsqu'une boucle tourne dans un champ magnétique extérieur et vice-versa .

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.

II-2. Loi de Lenz-Faraday

Dès 1834, bien avant la publication par Maxwell des équations locales de l'électromagnétisme, Heinrich Lenz donne une formulation des travaux expérimentaux de Faraday. Il remarque que les effets de l'induction dans un circuit sont liés à la variation du flux du champ magnétique à travers ce circuit : la variation du flux du champ magnétique à travers un circuit fermé fait apparaître une force électromotrice de boucle opposée au taux de variation temporelle du flux.

$$e = - \frac{d\Phi_{\vec{B}}}{dt}$$



Si le circuit comporte N spires on multiplie la variation de flux par N.

Les causes de la variation du flux peuvent être de différentes natures.

Nous nous limiterons à l'étude de deux cas particuliers simples.

Circuit fixe indéformable et champ magnétique variable : induction de Neumann

Un circuit fixe et indéformable est le siège de phénomènes d'induction dès lors que le champ magnétique varie au cours du temps dans l'espace où se trouve ce circuit. Si le champ magnétique a pour seule cause le courant qui circule dans le circuit lui-même, on parle de phénomène d'*auto-induction*. Dans le cas plus général où le champ magnétique variable est créé par d'autres courants ou aimants situés dans le voisinage du circuit, on parle de phénomènes d'*induction de Neumann*.

Nous limiterons notre étude au cas où les champs ne varient pas trop rapidement de telle sorte que l'on reste dans le cadre de l'approximation des régimes quasi stationnaires.

Circuit mobile et champ magnétique constant : induction de Lorentz

Une autre cause possible de variation du flux magnétique est le déplacement ou la déformation des circuits dans un champ magnétique indépendant du temps. Nous nous limiterons au cas particulier où les vitesses de déplacement des éléments de circuit sont très petites par rapport à la vitesse de la lumière. Ces conditions particulières définissent les phénomènes d'*induction de Lorentz non relativiste*.

<https://youtu.be/zxi74oTT9y4> **circuit mobile et champ magnétique constant**

<https://youtu.be/JBh6WDVILdE> circuit fixe et champ magnétique variable.

Principe de modération de Lenz

En 1934, Lenz fait remarquer le sens du signe « moins » dans la formule de l'induction. Ce signe n'est pas lié à la convention algébrique choisie pour exprimer les forces électromotrices, il est indépendant de la convention d'orientation du circuit. En clair, **ce signe a une signification physique fondamentale** : il traduit le fait que les effets de l'induction sont *modérateurs*, ils s'opposent à la cause qui les a produits.

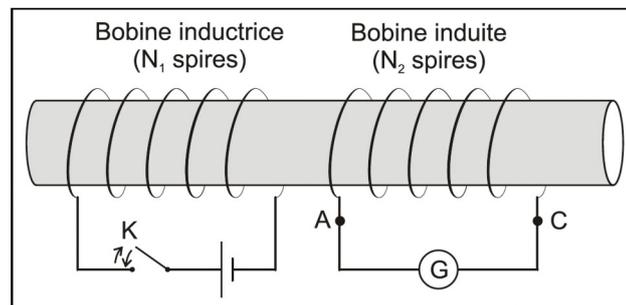
Principe de modération de Lenz

Les effets de l'induction s'opposent à la cause qui leur a donné naissance.

Attention ! Il ne faut pas en conclure que le champ magnétique induit est opposé au champ magnétique inducteur. Ce n'est pas le champ qui est la cause de l'induction, mais la variation du champ : le champ induit a un sens opposé au champ inducteur quand celui-ci est croissant, il a au contraire le même sens que le champ inducteur quand celui-ci diminue.

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

Questions : 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

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.

Quand on ferme l'interrupteur K :

1. Le champ magnétique inducteur :

La fermeture de K fait circuler du courant dans la bobine primaire. Ce courant crée un champ magnétique inducteur croissant dans la bobine.

2. Réaction de la bobine induite :

Le champ induit s'oppose à l'augmentation du champ inducteur. Donc, le champ magnétique induit est de sens opposé au champ inducteur.

3. Sens du courant induit :

Le courant induit dans la bobine secondaire (celle entre A et C) crée un champ opposé. En utilisant la règle du tire-bouchon (ou de la main droite) : le courant dans la bobine secondaire doit circuler dans le sens qui crée un champ opposé.

4. Polarité des bornes A et C :

Le courant circule à l'extérieur de la bobine induite du pôle + vers le -. Donc, si le courant va de C vers A, alors : C est + et A est -

Quand on ouvre l'interrupteur K :

1. Le champ magnétique inducteur :

Le courant dans la bobine primaire cesse brusquement, donc le champ inducteur diminue rapidement.

2. Réaction de la bobine induite :

Le champ induit s'oppose à la diminution du champ inducteur, donc il est dans le même sens que le champ inducteur initial.

3. Sens du courant induit :

Le courant induit crée un champ dans le même sens que l'ancien champ inducteur. Donc, le courant circule dans l'autre sens que précédemment. Si lors de la fermeture le courant allait de C vers A, ici il va de A vers C.

4. Polarité des bornes A et C :

Si le courant va de A vers C, alors : A est + et C est -

III APPLICATIONS

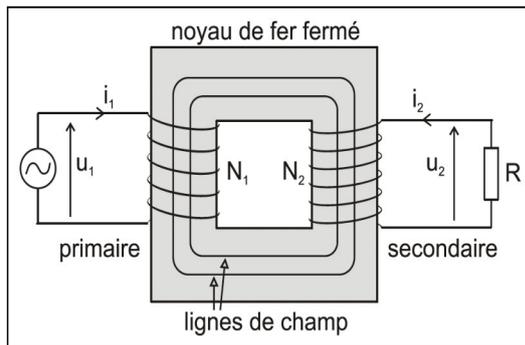
III-1. Le transformateur de tension

Principe

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.



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).

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)

$$e_1 = -\frac{d\Phi_1}{dt} = -\frac{[d N_1 B(t) S]}{dt} = -N_1 S \frac{[dB(t)]}{dt} \text{ et } e_2 = -N_2 S \frac{[dB(t)]}{dt}$$

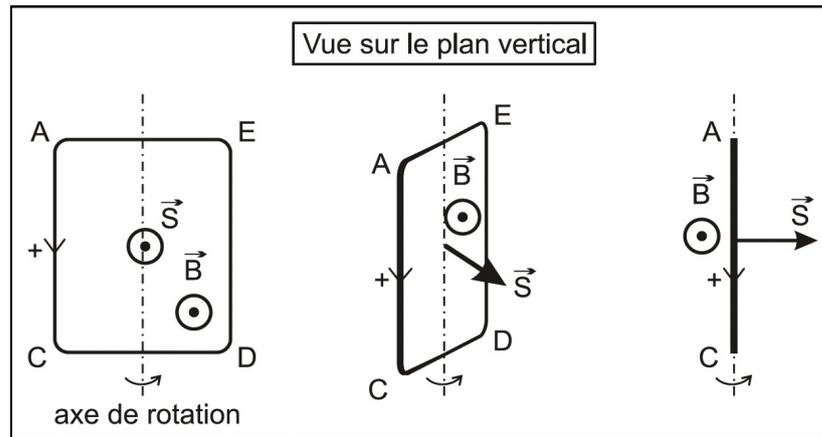
Pour un régime variable, $dB(t)/dt$ est non nul et on en déduit : $\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}$

III-2 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.

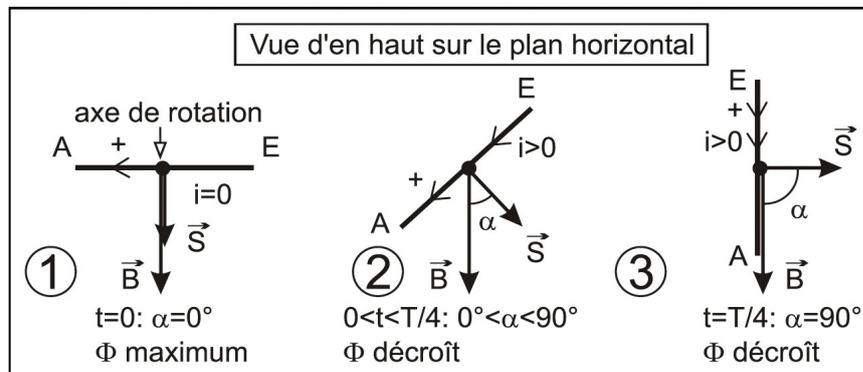
Afin de comprendre le fonctionnement de l'alternateur on considère tout d'abord une seule spire rectangulaire tournant à vitesse angulaire constante dans un champ magnétique inducteur uniforme B

. Les figures illustrent que le flux inducteur varie en fonction du temps.



Analysons comment varie le flux inducteur à différents instants !

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

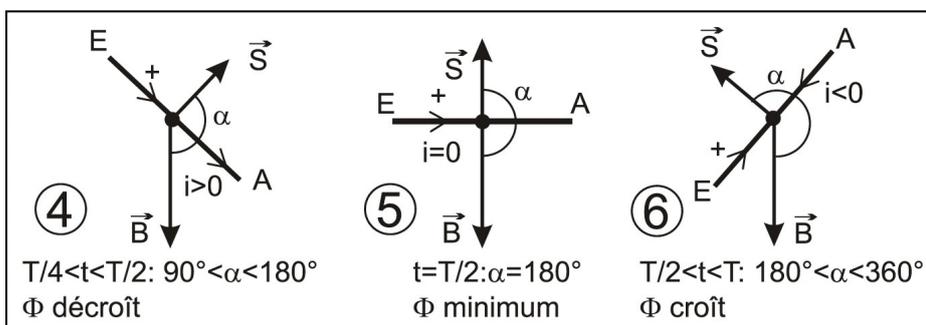


Appliquons la loi de Lenz :

si Φ augmente alors e et i sont négatifs

si Φ diminue alors e et i sont positifs

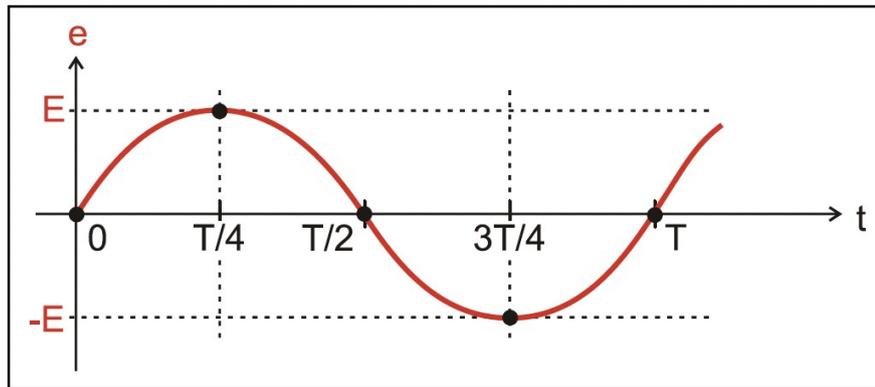
si Φ ne varie pas (extremum) alors e et i sont nuls



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 .



Les alternateurs des centrales électriques fournissent une tension sinusoïdale, de fréquence 50 Hz, d'une valeur efficace de l'ordre du kV. Pour réduire les pertes en ligne lors du transport, il faut augmenter la tension afin de diminuer l'intensité I du courant et donc les pertes par effet Joule.

On utilise à cet effet deux étages de transformateurs qui portent la tension à 400 kV. À l'arrivée la tension est progressivement abaissée.

Vidéo alternateur

<https://youtu.be/eGM8NYjkWS0?si=nvJnZK4fMh8HWRvX>

Vidéos d'expériences : Mise en évidence du phénomène d'induction.

Chute d'un aimant dans un tube conducteur: **une illustration spectaculaire de la loi de Lenz. "eddy currents" = les courants de Foucault.**

Loi de Lenz sur une plaque à induction: **la plaque à induction crée un flux au travers de la feuille d'aluminium, ce qui y génère des courants de Foucault et une action de Laplace.** Conformément à la loi de Lenz, cette action mécanique tend à diminuer les variations de flux en éloignant la feuille d'aluminium, qui décolle de la plaque. La feuille retombe car le système de sécurité de la plaque de cuisson coupe le courant d'alimentation (donc plus d'induction) et le redémarre périodiquement. Vous pouvez essayer chez vous ... mais ne forcez pas trop sur le système de sécurité de votre plaque.

<https://youtu.be/edprVzlNDuQ> palais de la découverte 1

<https://youtu.be/wNiJQDqMjBs> palais de la découverte 2

PLAN

I. FLUX D'UN CHAMP VECTORIEL

I-1. Flux élémentaire

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

II LOI DE FARADAY

II-1. Différentes manifestations de l'induction électromagnétique

II-2. Loi de Lenz-Faraday

III APPLICATIONS

III-1. Le transformateur de tension

III-2 L'alternateur