

L'INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE

Beaucoup d'appareils électriques ont besoin, pour fonctionner, d'une alimentation stabilisée que l'on branche sur le secteur 220V. Celle-ci possède, entre autres composants, un **transformateur** qui abaisse la tension. Le transformateur est une application de l'induction magnétique, comme l'alternateur ou le microphone...et bien d'autres dispositifs courants.

cas du déplacement d'un circuit dans un champ magnétique permanent

(Bibliographie: Guy Cabaret, Jean Brun, J.N Hazette éditions JB Baillière.1980)

Les lettres en caractères gras désignent des grandeurs vectorielles(ex: **B** ; **Em**)

1-Expérience fondamentale:

L'appareillage est constitué de deux rails conducteurs parallèles, horizontaux dont les extrémités sont connectées aux bornes d'un galvanomètre, un conducteur mobile NP est posé sur les rails .Un aimant en U permet de créer, au voisinage de NP, un champ magnétique sensiblement uniforme de vecteur **B** vertical.

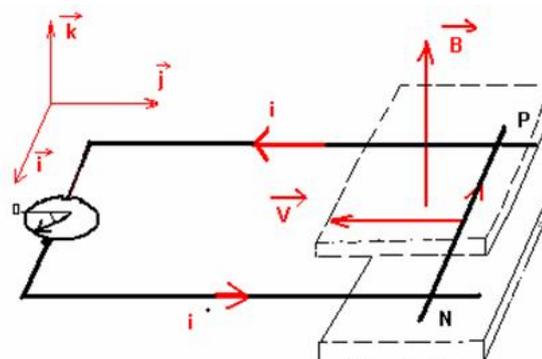
Notons que ce champ magnétique est indépendant du temps (champ dit permanent, ou magnétostatique).

Lorsqu'on déplace le conducteur NP à la vitesse **V**, le galvanomètre détecte le passage d'un courant dans le circuit. Le phénomène à l'origine de ce courant porte le nom d'induction magnétique.

On dit que le mouvement de NP dans le champ magnétique à induit un courant dans le circuit constitué par NP et les rails.

Nous pouvons constater que le sens du courant dépend:

-du sens de **V**, (**B** n'étant pas modifié).



-du sens de **B**, (**V** n'étant pas modifié).

2-Champ électromoteur d'induction:

La notion de champ électromoteur résulte d'une interprétation du phénomène d'induction.

Lorsque nous déplaçons le conducteur dans le champ permanent, nous déplaçons en fait les charges du réseau cristallin et parmi elles, celles des porteurs de charges responsables de la conduction électrique. Les porteurs de charges sont soumis à une force de Lorentz:

$$\vec{f} = q\vec{V}_\Lambda \vec{B}$$

Tout se passe comme si les charges étaient soumises à un champ électrique tendant à les mettre en mouvement, que nous appellerons champ électromoteur d'induction E_m .

Nous pouvons alors écrire:

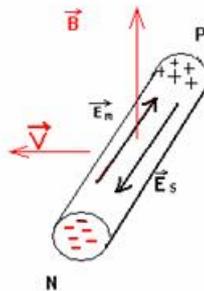
$$\vec{f} = q\vec{E}_m \quad \text{d'où} \quad \vec{E}_m = \vec{V}_\Lambda \vec{B}.$$

Nous constatons que le sens du courant induit est celui du champ électromoteur et que le trièdre V, B, E_m est direct.

Considérons maintenant le conducteur NP en circuit ouvert et se déplaçant à la vitesse V dans le champ magnétique B . Il y a accumulation de charges négatives en N et positives en P, cette accumulation va créer un champ électrostatique E_s de sens contraire à E_m . Finalement le champ électrique total est:

$$\vec{E}_s + \vec{E}_m = \vec{0}$$

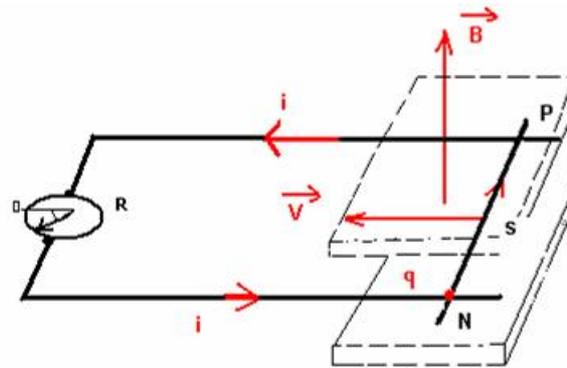
Et il n'y a plus de courant induit.



3-Force électromotrice induite:

Considérons un circuit fermé siège d'un courant induit. A priori il existe dans un élément de conducteur un champ électrostatique E_s et un champ électromoteur E_m s'il se déplace dans un champ magnétique.

Evaluons le travail des forces électriques agissant sur le charge q qui, partant du point N, effectue un tour complet dans le circuit. Distinguons les parcours successifs NSP et PRN.



-le travail dû à la contribution du champ électrostatique est: $W(NSP)+W(PRN)=q.U_{NP}+q.U_{PN}=0$. Ceci est une conséquence du fait que le champ électrostatique est conservatif.

-le travail dû à la contribution du champ électromoteur est: $W'(NSP)+W'(PRN)$

Comme le champ électromoteur est nul sur le parcours PRN, $W'(PRN)=0$ alors que $W'(NSP)$ n'est pas nul. Ceci traduit le fait que le travail dépend du chemin suivi et que le champ électromoteur n'est pas conservatif contrairement au champ électrostatique.

Le champ électromoteur est capable de fournir de l'énergie à des charges décrivant un circuit fermé, il est donc susceptible d'entretenir la circulation d'un courant, c'est cette propriété qui justifie le nom de «champ électromoteur».

Du point de vue énergétique $W'(NSP)$ mesure l'énergie fournie par l'opérateur qui déplace la tige. Le conducteur mobile se comporte comme un générateur qui transfère cette énergie sous la forme électrique au reste du circuit.

Par définition, la f.e.m induite entre 2 points (N et P) est l'énergie transférée par unité de charge, par l'intermédiaire du champ électromoteur:

$$e = \frac{W'(NSP)}{q} = \frac{q \cdot \vec{Em} \cdot \overrightarrow{NP}}{q} = \overrightarrow{Em} \cdot \overrightarrow{NP}$$

La force électromotrice induite apparaît comme une grandeur algébrique homogène à une différence de potentiel exprimée en volt .

Le conducteur étant orienté conventionnellement de N vers P, si **Em** a même sens que **NP**, «e» (noté alors e_{NP} pour rappeler le sens d'orientation) est positive et le courant induit i_{NP} est positif .

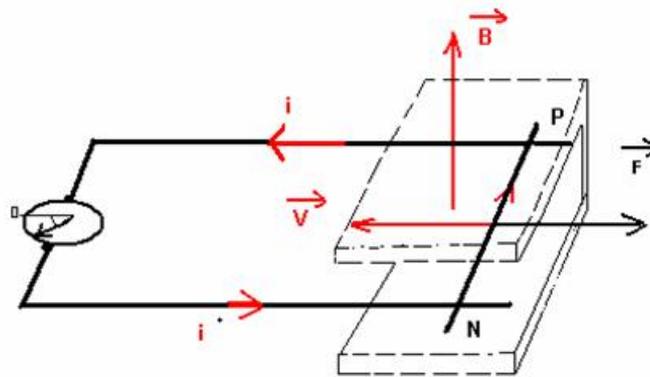
Si **Em** et **NP** sont de sens contraire $e_{NP} < 0$ et $i_{NP} < 0$.

e et i sont donc de même signe dans tous les cas.

Ordres de grandeur correspondant à l'expérience fondamentale:

Cas où **B** est perpendiculaire à **V**, $|e|=V.B.NP=0,10(m.s^{-1}).20.10^{-3}(T).0,05(m)=0,1mV$.

4-Sens du courant induit, loi de LENZ:



Dans l'expérience précédente, la circulation du courant crée une force de Laplace F

$$\vec{F} = I \cdot \overrightarrow{NP} \wedge \vec{B}$$

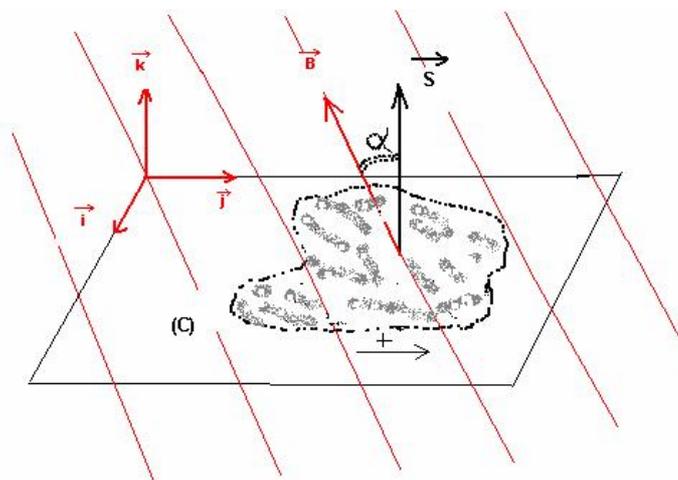
Cette force F s'oppose à la force exercée par l'opérateur pour déplacer le conducteur.

Cette observation est générale!

Le sens du courant induit est tel que, par ses effets, il tende à s'opposer aux causes qui lui ont donné naissance.

5-Flux de champ magnétique à travers une surface plane:

Considérons une surface plane d'aire S délimitée par le contour \odot . L'orientation du plan est de l'espace peut se faire par le trièdre direct $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$. Ceci revient à choisir un sens de parcours sur \odot cohérent avec celui qui amène \vec{i} sur \vec{j} par une rotation de $+P/2$ rad.



Par définition le vecteur surface \mathbf{S} est perpendiculaire au plan de la surface, son sens est celui de \mathbf{k} si le contour \odot est décrit dans le sens positif, sa mesure est égale à l'aire S de la surface.

La surface étant plongée dans un champ magnétique \mathbf{B} uniforme, on définit le flux F du champ magnétique à travers la surface par le produit scalaire:

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

Soit

$$\Phi = S.B.\cos\alpha \quad \text{avec } \alpha = (\vec{S}, \vec{B})$$

Si l'aire est exprimée en m^2 , le champ magnétique en teslas (T), le flux s'exprime en weber (Wb)

$$\alpha = \left[-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2}\right], \text{ alors } \cos\alpha \in [0, +1], \Phi > 0.$$

$$\alpha = \left[+\frac{\pi}{2}, 3.\frac{\pi}{2}\right], \text{ alors } \cos\alpha \in [0, -1], \Phi < 0.$$

Cas particuliers:

$$\alpha = 0, \quad \Phi = +B.S$$

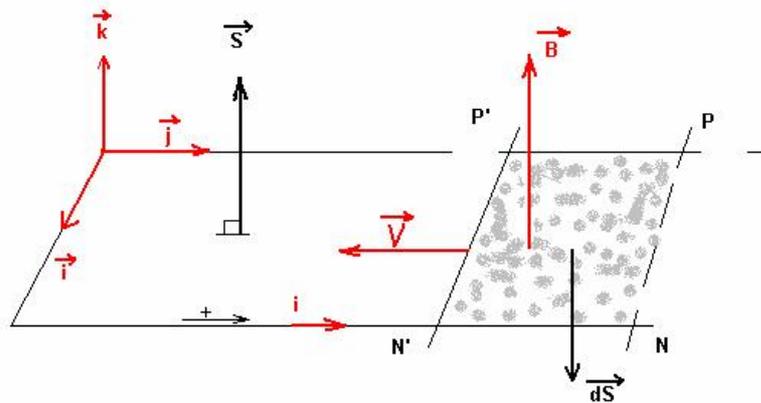
$$\alpha = +\pi \text{ rad}, \quad \Phi = -BS$$

$$\alpha = \pm \frac{\pi}{2} \text{ rad}, \quad \Phi = 0$$

6-Expression de la f.e.m en fonction du flux:

Prenons l'exemple de l'expérience fondamentale et précisons une convention d'orientation du circuit plan cohérente avec le trièdre direct $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$.

Pendant la durée dt , le conducteur passe de la position NP à N'P', il se déplace de Vdt en «balayant» (ou coupant) l'aire $V.NP.dt$.



Cette aire peut être représentée par le vecteur: $\vec{\delta S} = \vec{S}_f - \vec{S}_i$

Pour le sens de déplacement choisi, (celui qui rend e positif), dS est de sens contraire au vecteur k. Le flux balayé (ou flux coupé) pendant dt est:

$$\delta\Phi_c = \vec{\delta S} \cdot \vec{B} = -V \cdot NP \cdot B \cdot \delta t$$

Ce flux est négatif car \vec{dS} et \vec{B} sont de sens contraires. D'autre part nous retrouvons l'expression la valeur de la f.e.m induite e.

Compte tenu de l'orientation choisie du circuit, le courant induit est positif ainsi que la f.e.m induite.

$$Df_c < 0 \text{ et } e > 0$$

Nous en déduisons: $dF_c = -e \cdot dt$

ou

$$e = - \frac{\delta\Phi_c}{\delta t}$$

Une f.e.m positive résulte d'une diminution du flux coupé de \vec{B} à travers \vec{S} .

Généralisation: Si $dt \rightarrow 0$, le flux coupé s'identifie à une variation infinitésimale de flux $d\Phi$ résultant d'une modification de l'aire de la surface traversée par les lignes de champ, le champ restant constant.

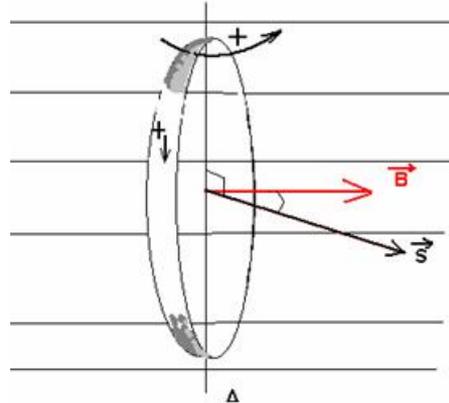
Cette variation de flux peut aussi provenir d'une variation du vecteur B. Nous admettrons que dans tous les cas:

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

Loi de Faraday: la f.e.m d'induction est égale à l'opposée de la dérivée par rapport au temps du flux du champ magnétique à travers le circuit.

7-Conséquences et applications

7-1: principe de l'alternateur à induit mobile:



Considérons une bobine de n spires identiques en rotation uniforme autour d'un axe D , perpendiculaire aux lignes d'un champ magnétique uniforme de vecteur \mathbf{B} . L'orientation du contour des spires permet de préciser le vecteur surface d'une spire \mathbf{S}_0 et de la bobine $\mathbf{S}=n\mathbf{S}_0$.

Le flux du champ magnétique à travers la bobine est:

$$\Phi = \vec{S} \cdot \vec{B} = S \cdot B \cdot \cos(\vec{S}, \vec{B})$$

Si les vecteurs \mathbf{S} et \mathbf{B} sont colinéaires et de même sens à la date $t=0$ et si la rotation se fait à la vitesse angulaire ω , à chaque instant l'angle:

$$(\mathbf{S}, \mathbf{B}) = \omega \cdot t \quad \text{et} \quad \Phi = S \cdot B \cdot \cos \omega t$$

La f.e.m induite est alors:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -SB\omega \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = SB\omega \sin \omega t = e_m \cdot \sin \omega t$$

e est une fonction alternative sinusoïdale du temps .

Ordre de grandeurs: $S_0=10^{-2} \text{ m}^2$; $n=500$; $B=0,2\text{T}$; $\omega=2\pi N=4\pi \text{ rad.s}^{-1}$ si $= 2\text{t.s}^{-1}$.

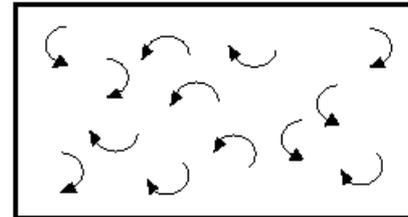
$e = 12,5 \sin 4\pi t$; $e_m = 12.5\text{V}$

7-2 Les courants de Foucault

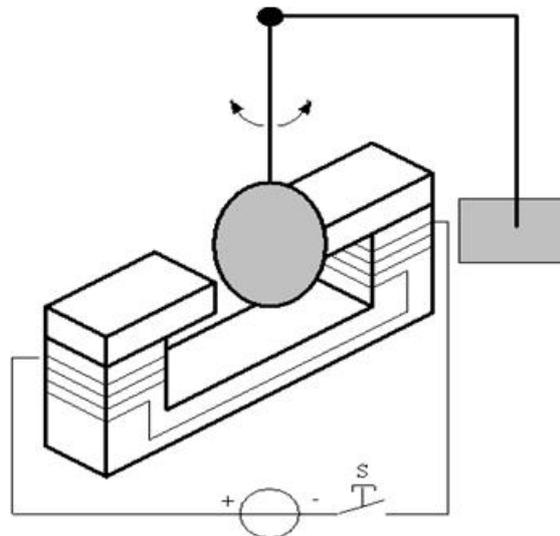
Lorsque des pièces métalliques conductrices sont plongées dans des champs magnétiques variables, ou lorsqu'elles sont elles-mêmes en mouvement dans un champ fixe, cela a pour effet d'induire dans ces pièces des courants parasites appelés :

Courants de Foucault

Ils ont des effets gênants comme celui d'échauffer les conducteurs par effet Joule.



a-Mise en évidence expérimentale:



Un pendule oscille autour d'un axe horizontal, le disque de cuivre passe dans l'entrefer de l'électroaimant. Il s'agit d'un aimant constitué d'une bobine parcourue par un courant I

En traversant l'entrefer, ce disque coupe donc les lignes d'un champ magnétique de direction horizontale.

En l'absence de champ d'induction magnétique B , le pendule oscille librement, sans amortissement notable, car seul le frottement de l'air le freine légèrement.

Lorsque nous fermons l'interrupteur S , le disque est très rapidement freiné.

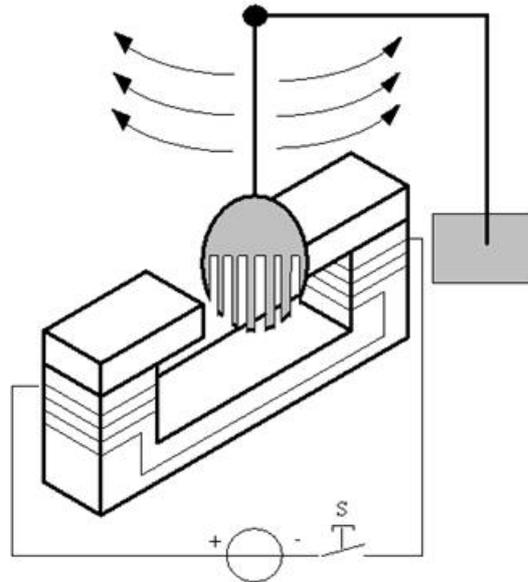
LORSQUE LE DISQUE METALLIQUE COUPE LES LIGNES DE CHAMP MAGNETIQUE B , DES COURANTS PRENNENT NAISSANCE DANS LA MASSE CONDUCTRICE. ON LES APPELLE COURANTS DE FOUCAULT.

En effet, le mouvement du disque à la vitesse v dans l'entrefer provoque l'apparition d'une f.e.m induite e

$$e = B \times l \times v$$

Cette tension induite e prend naissance dans un conducteur et entraîne la circulation de courants électriques qui peuvent être très intenses. selon la loi de Lenz. Les interactions mécaniques qui découlent de la circulation des courants, s'opposent au mouvement qui leur donne naissance.

Il y a freinage. Il y a également échauffement par effet Joule.



Dans la même expérience, nous remplaçons le disque plein par un disque dans lequel nous avons pratiqué des entailles.

Nous constatons que lors de la fermeture du commutateur S, le freinage du pendule est beaucoup moins efficace car les courants de Foucault sont, eux, moins intenses.

Remarques :

Les trajets suivis par les courants de Foucault dans la matière métallique sont indéterminés.

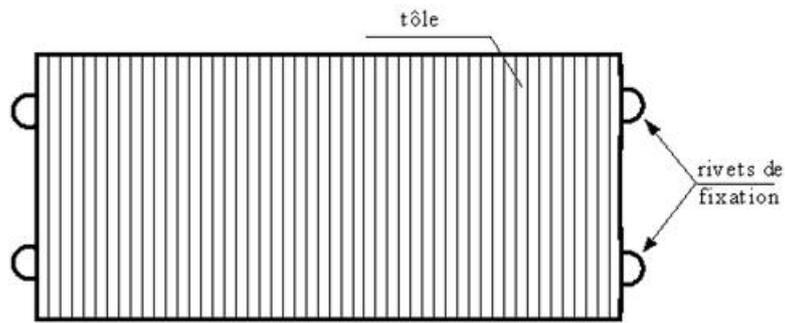
Dans certains cas, nous employons des tôles pour allonger le circuit, afin d'augmenter la résistance électrique R et ainsi diminuer le courant I .

Les courants de Foucault peuvent être utiles pour réaliser des ralentisseurs pour les poids lourds, ou dans les compteurs d'énergie.

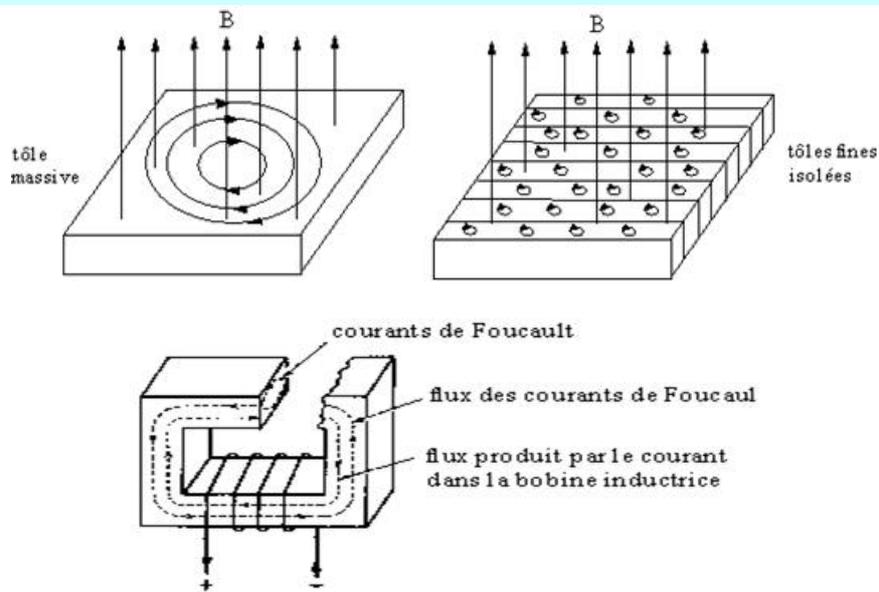
b-Réduction des courants de Foucault

Les courants de Foucault peuvent être nuisibles, provoquant des échauffements des tôles des machines électriques, comme nous le verrons dans le chapitre sur les machines à courant alternatif sinusoïdal et les transformateurs.

Nous remédions à ces effets en construisant des noyaux au moyen d'empilement de tôles minces séparées par un vernis isolant.



Ces tôles sont rivetées ensemble, et sont isolées électriquement entre-elles. Les courants induits sont ainsi de plus faible intensité.



Exemple de courants de Foucault dans le noyau d'un transformateur

Pour limiter les courants de Foucault et les pertes par effet Joule qui en découlent, les noyaux des transformateurs sont constitués de tôles isolées entre-elles, comme le montre l'exemple ci-dessous :

