Chapitre 11

Sommaire

- Tension induite
- Inductance L
- Self induction
- Les courants de Foucault
- Réduction des courants Foucault
- Entraînement

Introduction

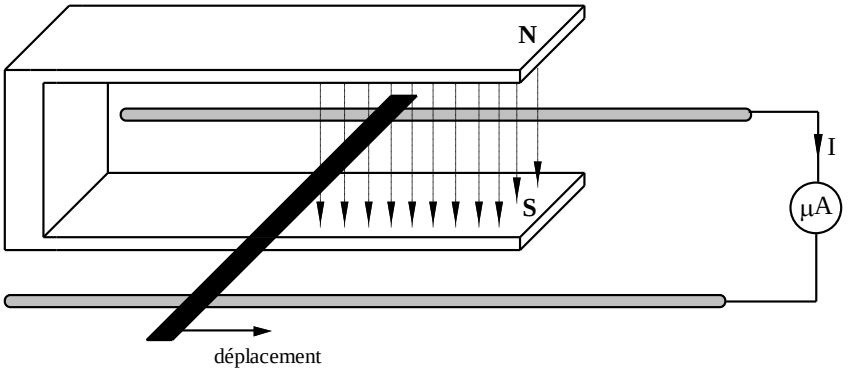
11. Magnétisme :

L'homme, depuis ses débuts sur terre, a cherché à se diriger. Le repérage d'une direction peut se faire à l'aide des astres, en repérant par exemple l'étoile polaire qui nous indique le Nord, mais ce système ne fonctionne que la nuit. Si il fait jour, il est possible de

11.1 Tension induite U_i :

Les découvertes de Faraday énoncent le principe suivant :

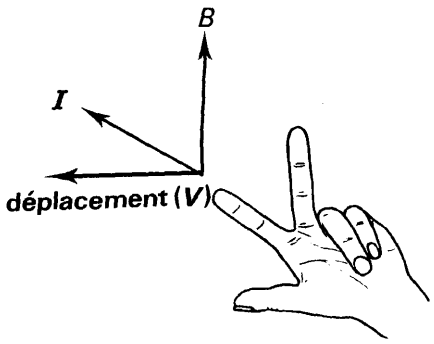
Le déplacement d'un conducteur dans un champ d'induction B fait apparaître une tension induite U_i aux bornes de ce conducteur.



Le micro-ampèremètre est branché aux bornes des deux tiges conductrices. Lorsque nous déplaçons le conducteur dans un champ magnétique uniforme, le micro-ampèremètre dévie.

Le courant induit a un sens tel qu'il tend à s'opposer à la cause qui lui a donné naissance.

Pour déterminer le sens du courant dans le conducteur, nous utilisons la main gauche.



Gauche - Générateur

Le pouce correspond au déplacement v

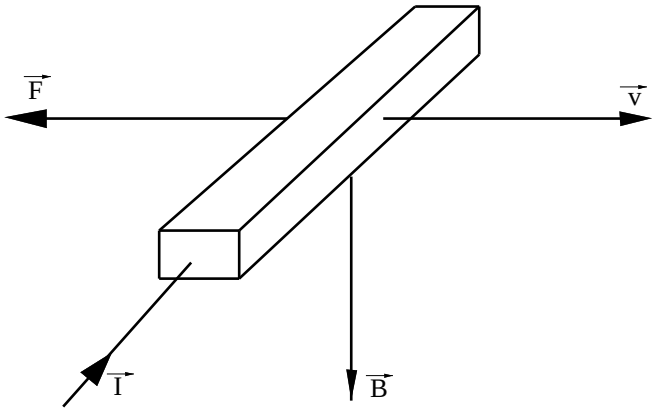
L'index correspond au sens du courant I

Le majeur correspond à l'induction B

Le micro-ampèremètre est branché aux bornes des deux tiges conductrices. Lorsque nous déplaçons le conducteur dans un champ magnétique uniforme, l'aiguille du micro-ampèremètre dévie.

Si nous admettons un déplacement de la barre selon l'axe des x positif ($\vec{v}$) , la barre est le siège d'un tension induite U_i opposée.

La force $\vec{F}$ s'oppose au mouvement $\vec{v}$. Le sens de la force $\vec{F}$ s'obtient avec les règles vues précédemment.



La relation nous permettant d'obtenir la valeur de la tension induite U_i est la suivante :

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

En pratique, cette variation de flux d'induction $\Delta\Phi$ (delta phi) est obtenue par un déplacement $\vec{l}$ relatif d'un élément rectiligne du circuit par rapport au champ magnétique $\vec{B}$ inducteur.

Cette tension induite U_i est donnée par la relation vectorielle suivante :

$$\vec{U}_i = -\vec{B} \times l\vec{v}$$

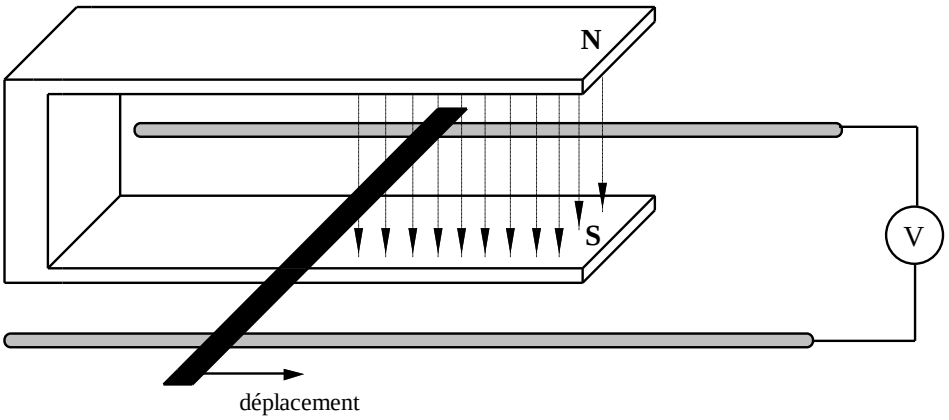
Les grandeurs $\vec{B}$, l $\vec{I}$ et $\vec{v}$ sont souvent perpendiculaires entre elles, ce qui donne un sin θ = 1. D'où le produit scalaire admis :

$$U_i = B \cdot l \cdot v$$

Cette disposition implique la présence de la plus grande tension induite U_i. Comme pour la tension électrique U , la tension induite U_i est exprimée en volt [V].

Si pour une raison ou pour une autre, B , l ou v ne sont pas perpendiculaires entre elles, nous multiplierons par le sinus des angles appropriés.

<u>Exemple :</u>



Un aimant permanent replié, en TICONAL, possède une induction de 0.4 [T].

Nous déplaçons un conducteur long de 20 [cm] dans l'espace formé par l'aimant. Cet espace mesure 50 [cm] , et le déplacement est effectué de façon rectiligne durant 20 [s] .

Calculer la tension induite U_i

Les grandeurs sont considérées perpendiculaires.

<u>Données :</u> l = 20 [cm] l_{aimant} = 50 [cm] t = 20 [s] B = 20 [T]

<u>Relation :</u> $\vec{U}_i = -\vec{B} \times l\vec{v}$

Puisque nous avons admis la perpendicularité, nous pouvons utiliser la relation suivante :

$$U_i = -B \cdot l \cdot v$$

Le signe - devant le symbole de l'induction B ne nous est pas utile ici. Elle nous indique le sens de la tension U_i , mais nous ne voulons ici que la quantifier. C'est ce que nous appelons parfois la valeur absolue d'un nombre. Nous ne tenons pas compte de son signe, nous notons alors :

$$U_i = -B \cdot l \cdot v \quad \Rightarrow \quad |U_i|$$

Application numérique :

Calcul de la vitesse v : $v = \frac{d}{t} = \frac{0.5}{20} = 25 \cdot 10^{-3} \left[\frac{m}{s}\right]$

$U_i = -B \cdot l \cdot v = 20 \cdot 0.2 \cdot 25 \cdot 10^{-3} = -100$ [mV]

Valeur absolue : $|U_i| = 100$ [mV]

11.2 Inductance L :

Dans le circuit que nous venons de calculer, nous possédons une tension induite U_i . Cela signifie que nous avons un circuit électriquement fermé.

Schéma :

Le conducteur est une source de tension induite U_i que l'on mesure aux bornes du voltmètre de grande résistance.

Il s'agit d'une application de la loi d'Ohm !

Nous pouvons admettre que la tension induite U_i est égale au produit du courant induit I_i circulant pendant un certain temps t , et de l'inductance L.
(caractéristique du montage à laisser passer les lignes de force).

Cette grandeur porte le nom de perméance Λ pour le circuit magnétique. Mais nous sommes dans un circuit mélangeant le magnétisme et l'électricité.

Nous lui donnerons donc le nom d'inductance.

Symbole de la grandeur : L

Symbole de l'unité : [H] henry

En utilisant cette nouvelle notion, nous pouvons écrire la relation suivante :

$$U_i = -L \cdot \frac{I}{t}$$

tension induite U_i [V] inductance L [H]

courant I [A] temps t [s]

Dans les schémas électriques, nous symboliserons l'inductance pure L des façons suivantes :

bobine L avec noyau | inductance pure L avec noyau | inductance pure L sans noyau

Remarque : le trait au dessus de la bobine représente le noyau.

11.3 Self-induction :

C'est le physicien russe Heinrich Lenz (1804-1865) qui fit la découverte du sens des courants induits appelée **loi de Lenz.**

Loi selon de Lenz s'énonce comme suit :

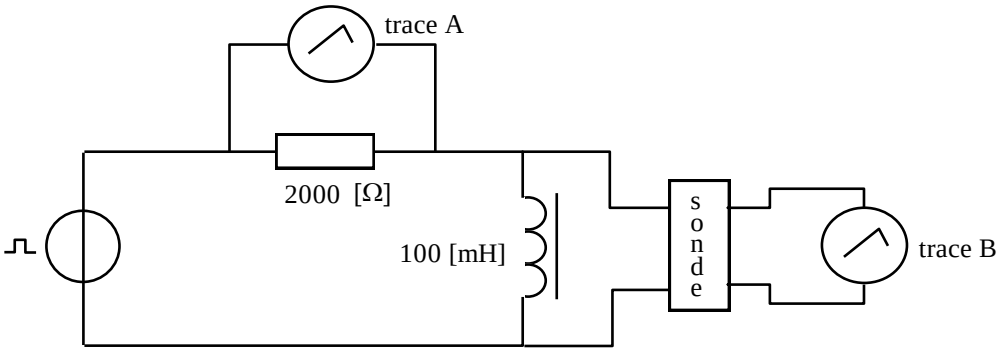
Le courant induit a un sens tel que ses effets s'opposent à la cause qui lui a donné naissance.

Plus simplement, le courant induit tend à s'opposer au flux inducteur.

Nous constatons, par expérience, qu'une bobine parcourue par un courant électrique I provoque un flux magnétique Φ . C'est la bobine elle-même qui génère une tension induite U_i pendant le temps t où un courant I la traverse. Selon l'application de la relation que nous venons d'étudier plus haut :

$$U_i = -L \cdot \frac{I}{t} \qquad \text{en volt [V]}$$

Pour effectuer notre expérience et nos mesures, nous réalisons le montage suivant :



La bobine possède certaines caractéristiques magnétiques dont nous mesurons les conséquences électriques. Pour notre mesure nous utilisons une bobine qui a une inductance L de 100 [mH] . Cette bobine est utilisée, en électrotechnique, pour obtenir des flux magnétiques Φ importants qu'il ne nous est pas possible d'obtenir à l'aide d'aimants permanents.

Au moyen de l'oscilloscope (voir la description de instruments de laboratoire, au début de ce cours), nous mesurerons la présence d'une tension induite U_i aux bornes de la bobine. Cette tension induite sera présente lorsqu'un courant I la traversera. Nous allons procéder pas à pas à l'interprétation de l'expérience.

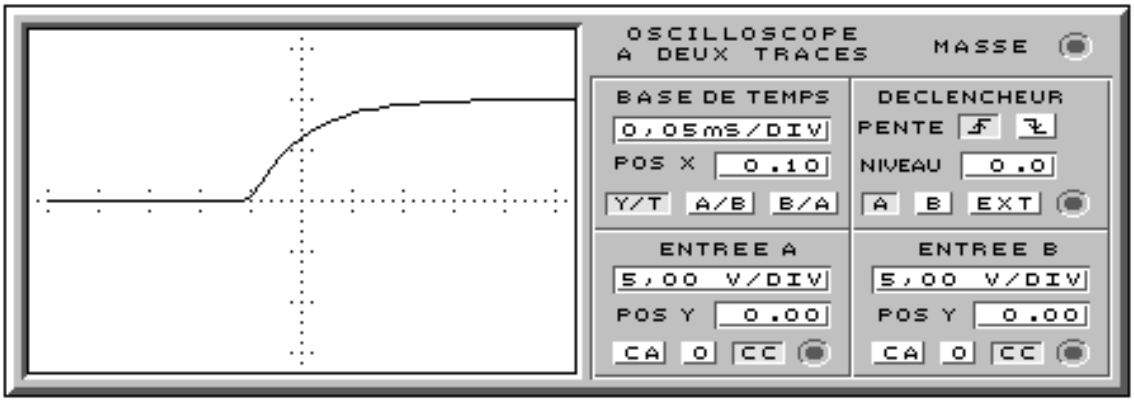
11.4 Phase 1 :

Lors de la mise en circulation des électrons, il y a dans le circuit une variation de courant I qui dure un certain temps t.

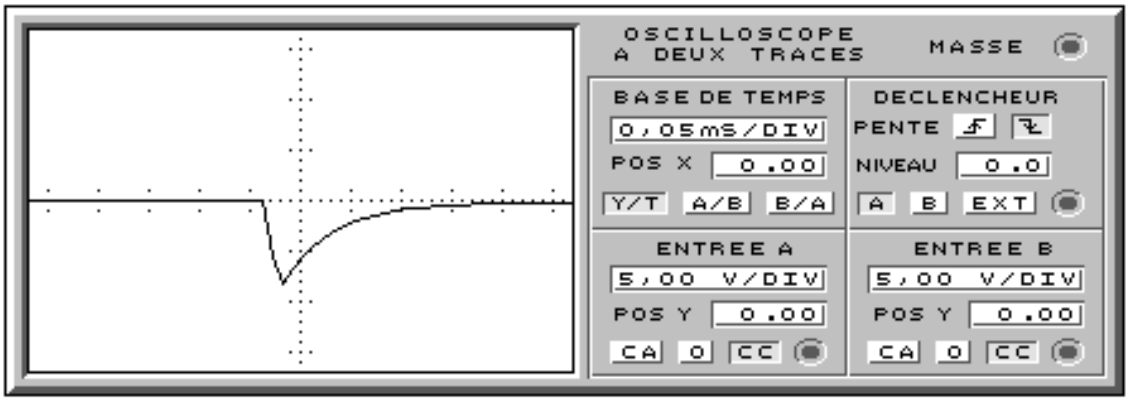
Avec l'oscilloscope il n'est possible de mesurer un courant. Pour obtenir sa forme, nous mesurons la tension aux bornes de la résistance de 2 [kΩ].

Le courant est proportionnel à la tension aux bornes de la résistance et par simple application de la loi d'Ohm, il est facile de le calculer. Pour cela, il faut connaître la valeur de la résistance ce qui est le cas dans notre mesure.

Courbe du courant :



Courbe de la tension induite :



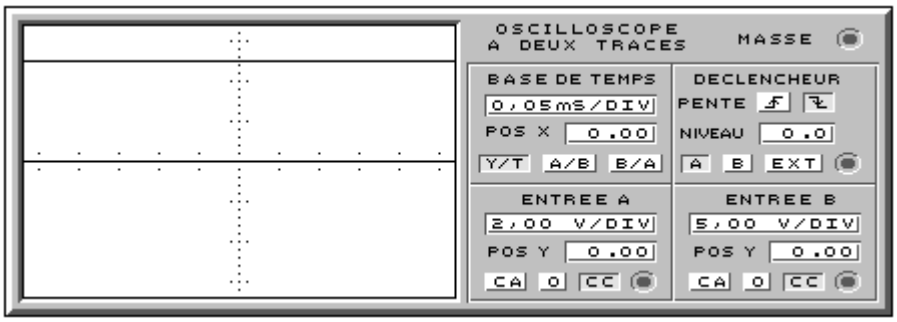
Cette courbe nous montre la forme de la tension aux bornes de la bobine. Les pointes représentent la tension induite par la bobine. Ce phénomène s'appelle la self induction.

Nous constatons que la tension induite U_i aux bornes est opposée au passage du courant I . Le courant I augmente de 0 à la valeur maximum. La tension induite U_i va de 0 à moins la valeur maximum.

Le signe négatif est bien la signification et la preuve de la loi de Lenz.

11.5 Phase 2 :

Notre bobine est toujours parcourue par un courant I constant. La variation de courant I est donc nulle.



Aucune tension induite U_i n'est mesurée par l'oscilloscope, et il nous montre l'image suivante :

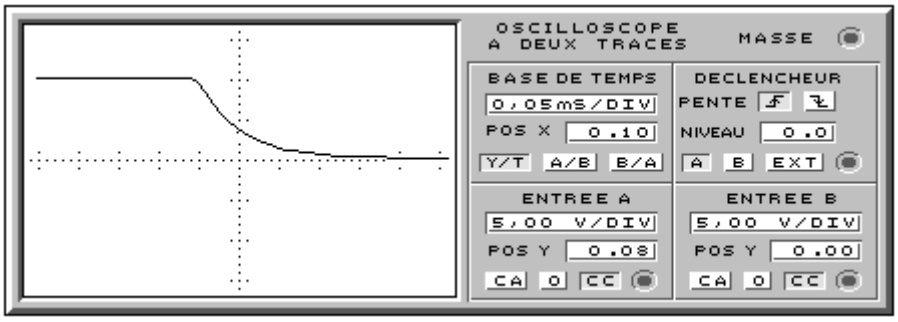
Si la variation du courant I est nulle, la tension induite U_i est également nulle, car :

$$U_i = -100 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0}{t} \Rightarrow \ 0 \ [V]$$

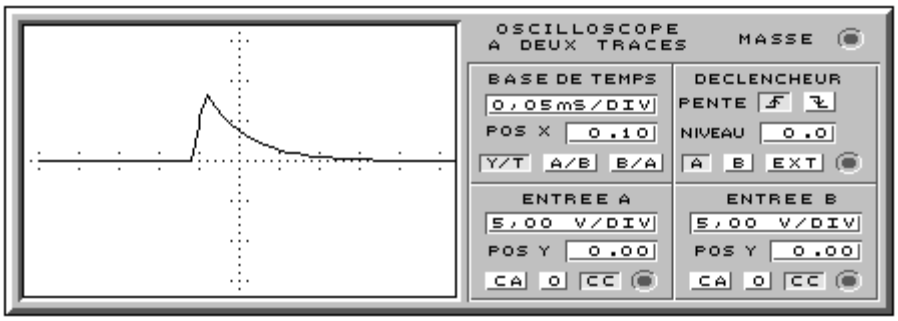
11.6 Phase 3 :

Après un certain temps de fonctionnement, nous interrompons le courant I dans la bobine. Cela a comme influence de faire varier le courant pendant un certain temps. Le courant I passe de la valeur maximum à la valeur 0.

<u>Courbe du courant :</u>



Courbe de la tension induite :



11.7 Interprétation de la mesure :

Nous constatons que la tension induite U_i aux bornes de la bobine est opposée à celle de la source de tension. Le courant I diminue de la valeur maximum à 0.

La tension induite U_i va de 0 à une valeur maximum. Le signe négatif est bien la signification de la loi de Lenz. De cette expérience, nous pouvons énoncer la règle de la self-induction qui, de façon générale, est la suivante :

> La self-induction apparaît dans un circuit composé d'inductances, et parcouru par un courant I variable et tend à s'opposer à ces variations

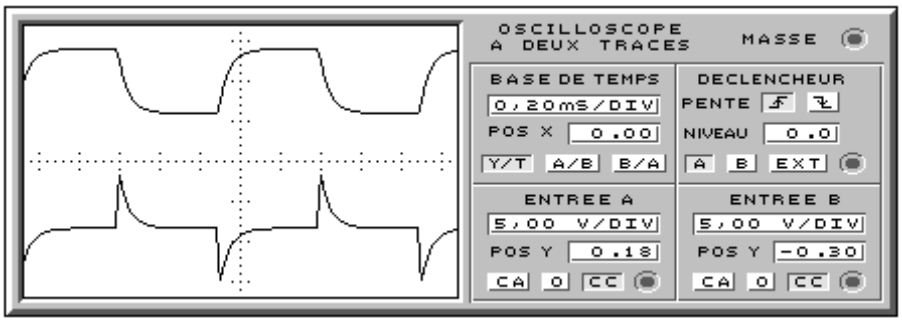
La présence d'un noyau et la forme de la bobine influencent le phénomène de self-induction.

L'étude complète des différentes bobines sort du cadre de ce cours. Pour de plus amples informations, il sera nécessaire de consulter un cours de physique.

Nous constatons, comme pour le condensateur, que la bobine possède aussi une constante de temps τ (tau).

Cette constante de temps τ est donnée par le rapport de $\tau = \frac{L}{R}$

La résistance R est donnée par les caractéristiques du circuit. Rappel : $R = \frac{\rho \cdot l}{A}$

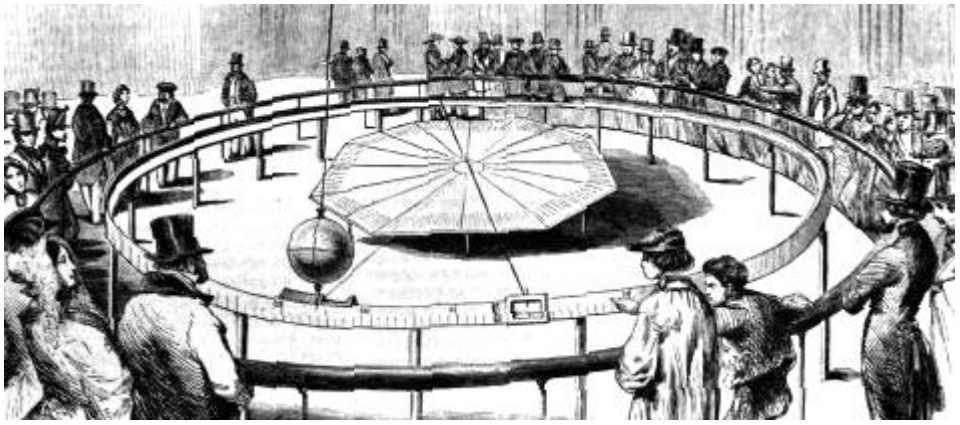


Résultats de la mesure de notre montage sur une temps plus long

La courbe A représente le courant dans le montage.

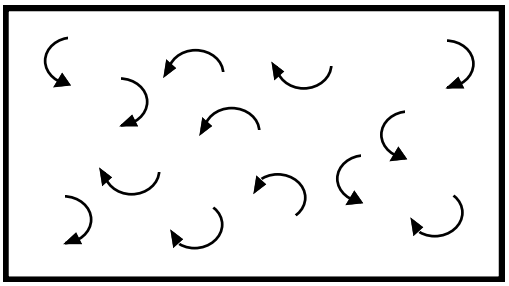
La courbe B représente la tension induit U_i aux bornes de la bobine.

11.8 Les courants de Foucault



Expérience du pendule de Foucault (doc. dictionnaire encyclopédique Larousse 1986)

Lorsque des pièces métalliques conductrices sont plongées dans des champs magnétiques variables, ou lorsqu'elles sont elles-mêmes en mouvement dans un champs 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.

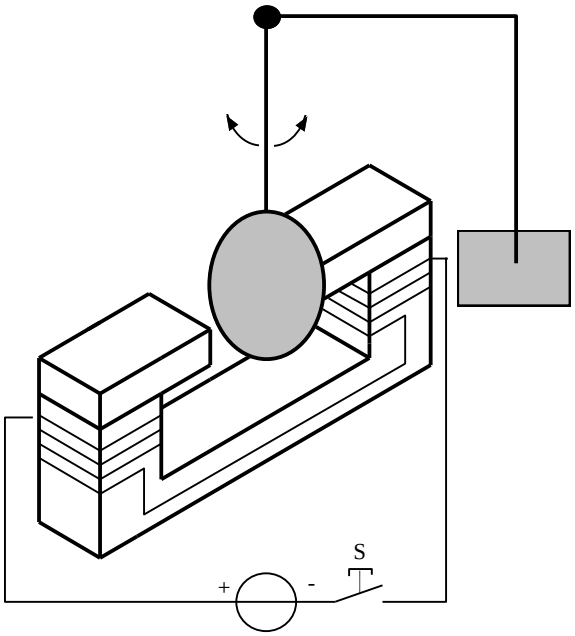
11.9 Expérience, pour démontrer la présence des courants de Foucault.

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 FORCE MAGNETIQUE H, 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 tension induite U_i .

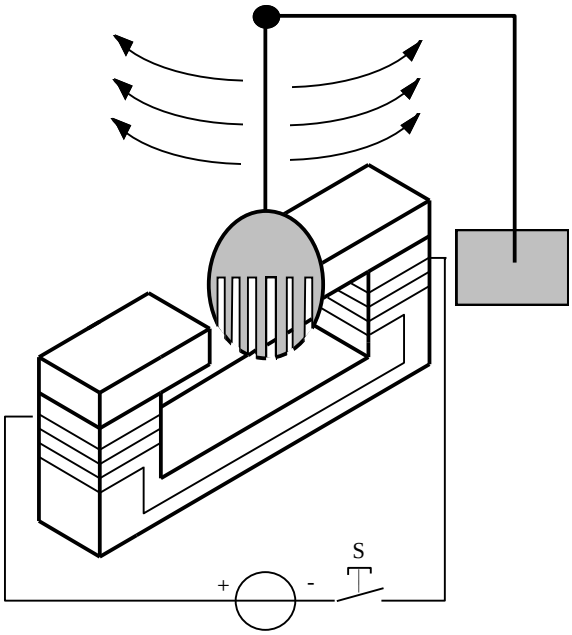
$$|U_i| = B \cdot l \cdot v$$

Cette tension induite U_i 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.



<u>Remarques :</u>

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

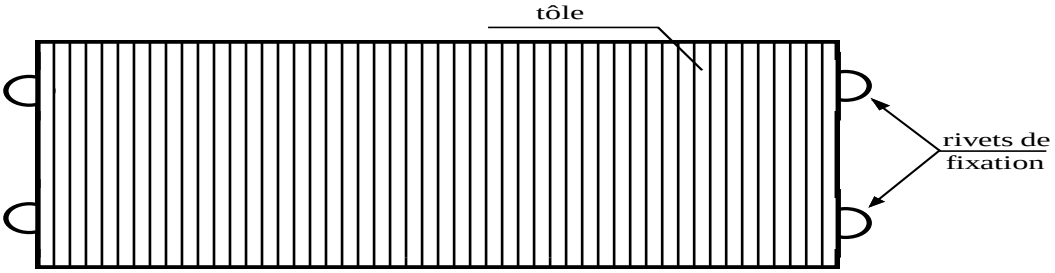
Dans certains cas, nous employons des tôles pour allonger le circuit, afin d'augmenter la résistance électrique R et ainsi diminuer le courant I.

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

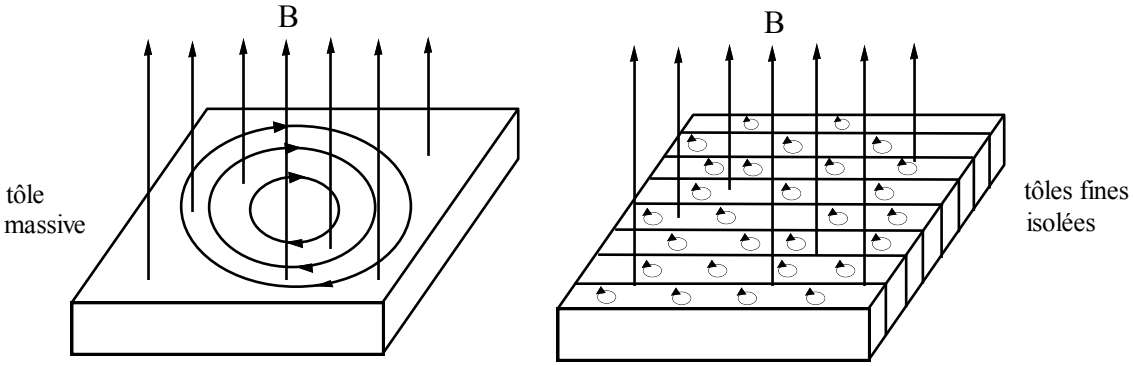
11.10 Réduction des courants de Foucault :

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

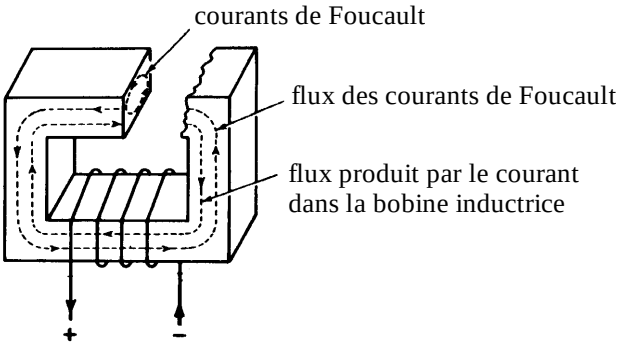
Nous remédions à ces effets en construisant des noyaux au moyen d'empilement de tôles minces séparées par un vernis isolant.



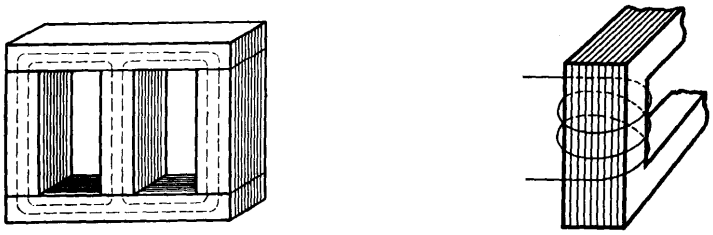
Ces tôles sont rivetées ensemble, et sont isolées électriquement entre-elles. Les courants induits sont ainsi de plus faible intensité.



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 :



11.8 Documentaire

Nikola Tesla (1856-1943). Ingénieur électricien et inventeur yougoslave. Après ses études d'ingénieur à Budapest, il s'installe à New York en 1887 pour fonder une entreprise de construction d'alternateur. On lui doit la réalisation du premier moteur asynchrone et l'invention des courants polyphasés, et du montage en étoile. En 1889 il étudia les circuits à haute fréquences et imagina le coulage de deux circuits par induction mutuelle. Ces études menèrent à la mise au point des premiers générateurs industriels d'ondes hertziennes.

James Clerk Maxwell (1831-1879). Physicien écossais. Professeur au King's College de Londres jusqu'en 1865. Il démontre en 1860 qu'à une même température, l'énergie cinétique moyenne des molécules en dépend pas de leur nature. C'est dans le cadre de cette théorie qu'il introduit le fameux "démon de Maxwell". Disciple de Faraday, il crée en 1862 le concept de "déplacement" et de "courant de déplacement apparaissant dans les diélectriques soumis à un champs électrique. Après de longues années d'élaboration, il donne les équations générales du champ électromagnétique.

Joseph Henry (1797-1878). Ingénieur et professeur d'université américain. Il améliora les électroaimants, en enroulant une deuxième couche de spires sur la première. Il développa en 1831 une première forme de télégraphe avec une ligne de 1 kilomètre et demi. Ses travaux sur l'induction électromagnétique furent menés parallèlement à ceux de Faraday. Il est surtout connu pour sa découverte en 1832 de l'auto induction et de l'extracourant.

Wilhelm Eduard Weber. Physicien allemand (1804-1891). Il étudie d'abord les phénomènes d'acoustique, la polarisation des ondes sonores et la compensation de température des tuyaux d'orgues. Avec Gauss, il réalise en 1833, d'après les indications d'Ampère, un télégraphe électrique. En 1846, il donne la loi fondamentale concernant les forces exercées par les particules électrisées en mouvement.

Heinrich Friedrich Lenz (1804-1865). Physicien russe. Il fut recteur de l'académie de Saint-Pétersbourg. Il est connu pour sa découverte de la loi donnant le sens des courants induits, la **Loi de Lenz**. Il observa en 1835 l'accroissement de la résistance électrique des métaux avec la température et étudia l'effet Peltier.

Léon Foucault, physicien français (1819-1868), est le type même du scientifique autodidacte. Il commença des études de médecine avant de se diriger vers la physique. Durant quelques temps, il rédige un feuilleton scientifique dans un journal. Ses premières études se penchent sur la détermination de la vitesse de la lumière dans différents milieux tels que l'air ou le vide. C'est vers 1850 qu'il donne l'explication de la théorie d'Arago sur le magnétisme de rotation. Ce qui le conduira à définir les courants induits dans les masses métalliques.

Ces courants sont appelés **Courants de Foucault**.

En 1851, il met en évidence la rotation de la terre au moyen d'un pendule. Il s'agit d'une expérience passionnante que l'on peut voir depuis peu à Neuchâtel. Ses études sur le pendule l'amènent au développement du gyroscope et à la réalisation de divers types de télescopes.

11.9 Entraînement

1. Qu'appelle-t-on tension induite ?
2. Quelles sont les conditions pour obtenir une tension induite ?
3. Qui a démontré le phénomène de tension induite ?
4. Que se passe-t-il si les lignes de force de l'aimant ne sont plus perpendiculaires au conducteur ?
5. Définir en quelques mots la loi de Lenz
6. Dessiner les symboles d'une bobine pure et d'une bobine comportant une certaine résistance.
7. Quelle précaution faut-il prendre pour protéger un circuit comportant une bobine et éliminer la surtension crée par la self-induction ?
8. Comment se produisent les pertes par courants de Foucault?
9. Les courants de Foucault se produisent-ils dans une pièce en aluminium, et pourquoi ?
10. Les courants de Foucault se produisent-ils dans une pièce en PVC ? (justifiez votre réponses).
11. Peut-on mesurer un courant de Foucault à l'aide d'un ampèremètre ? (justifiez votre réponses).
12. Pourquoi a-t-on moins de courants de Foucault dans un noyau de tôles feuilletées ?
13. Citer quelques exemples d'utilisation des courants de Foucault :
14. Quelles sont les conséquences des pertes par effet Joule ?
15. Donner quelques exemples où il est important de limiter les pertes par effet Joule. (Pas forcément des exemples en magnétisme)

1. Une bobine possède au total 90 [m] de conducteur soumis à l'induction. Ces conducteurs se déplacent à la vitesse de 0.8 [$m \cdot s^{-1}$] dans un champ magnétique de 0.2 [T].
   Calculer la tension induite aux bornes de la bobine.

2. Dans un champ magnétique de 1.2 [T], 125 conducteurs de 20 [cm] sont réunis en série.
   Leur déplacement s'effectue à la vitesse de 7.5 [$m \cdot s^{-1}$].
   Quelle est la tension induite ?

3. L'induit d'une génératrice engendre une tension de 44 [V]. Les conducteurs ont une longueur de 11.4 [m] dont seulement le 85 % sont soumis au champ magnétique dans lequel ils se déplacent à la vitesse de 21.6 [$km \cdot h^{-1}$].
   Déterminer l'induction magnétique.

4. Le rotor inducteur d'un alternateur engendre 1.15 [T] et tourne à la vitesse de 46.8 [$km \cdot h^{-1}$].
   La bobine statorique est composée d'une certaine longueur de fil conducteur dont seulement le 80 % sont induits. La tension induite aux bornes de la bobine est de 2511.6 [V]
   Quelle est la longueur totale du fil de la bobine statorique ?

5. Un bobine de 5 [mH] et de résistance R supposée nulle est parcourue par un courant de 0.5 [A].
   Sachant que le courant s'annule en 10 [ms], calculer la valeur de la tension induite obtenue aux bornes de la bobine.
   Que se passe-t-il si le courant s'annule brusquement et non pas progressivement ?

<u>Réponses :</u> 1. U_i = -14.4 [V] 2. U_i = -225 [V] 3. B = 756.8 [T] l = 210 [m]
5. U_i = -250 [mV] si le courant s'annule brusquement, U_i va augmenter