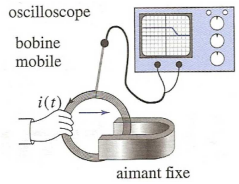
Induction et Force de Laplace IFL3

Induction électromagnétique
1 - Circuit Fixe B variable



1

1 Le phénomène d'induction : mise en évidence et lois fondamentales **1**
1.1 Observations expérimentales . . . 1
1.2 Nature du phénomène . . . 2

2 Rappel : Flux du champ B à travers le circuit **2**

3 Loi de Lenz-Faraday - phénomène d'induction **3**
3.1 Loi de Lenz - loi de modération . . . 3
3.2 Tension électromotrice induite et Loi de faraday . . . 5
3.3 Importance technologique des phénomènes d'induction électromagnétique . . . 5

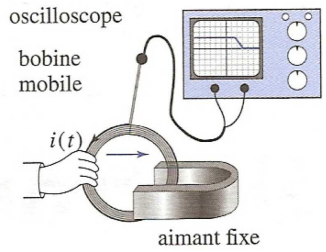
4 Circuit fixe dans un champ magnétique variable **6**
4.1 Induction propre . . . 6
4.1.1 Inductance d'un circuit . . . 6
4.1.2 Phénomène d'autoinduction et circuit électrique équivalent . . . 7
4.1.3 Etude énergétique . . . 8
4.2 Induction mutuelle . . . 9
4.2.1 Phénomène de couplage magnétique . . . 9
4.2.2 Circuit électriques et équations couplées . . . 11
4.2.3 Etude harmonique . . . 12
4.2.4 Aspect énergétique . . . 12

5 Le transformateur **14**
5.1 Constitution . . . 14
5.2 Le transformateur parfait . . . 15
5.3 Le transformateur réel . . . 17
5.4 Courants de Foucault . . . 20

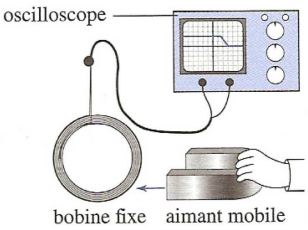
1. Le phénomène d'induction : mise en évidence et lois fondamentales

Ce phénomène est lié au couplage magnétique entre deux circuits électriques (ou sources de champ magnétique) et à une évolution de ce couplage.

1.1. Observations expérimentales



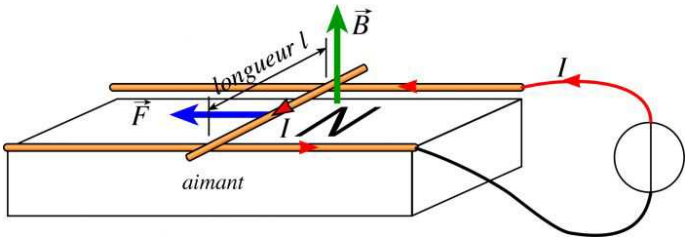
Lorsque l'aimant est en mouvement au voisinage de la bobine, on constate une tension aux bornes de la bobine à l'aide d'un oscilloscope.



Lorsque l'on approche un aimant d'une bobine, ayant les extrémités reliées à un galvanomètre (ou à un oscilloscope), on s'aperçoit que le galvanomètre est parcouru par un courant de sens constant, tant que l'aimant est en mouvement, ce courant s'annulant lorsqu'il devient immobile. Lorsqu'on éloigne l'aimant, les faits sont identiques, le courant ayant alors un sens opposé au sens précédent.

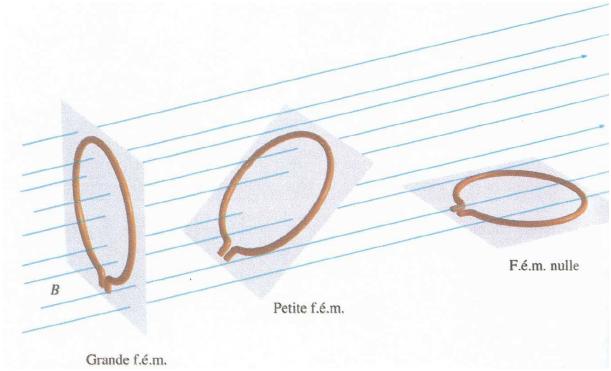
Le courant qui apparaît est plus important si la vitesse est grande, si le nombre de spires est grand.

On place un circuit dans un champ magnétique B_0 stationnaire et uniforme. Ce circuit est fermé grâce à un rail mobile.



Lorsque l'on déplace le rail mobile, le galvanomètre G est parcouru par un courant dont le sens change lorsqu'on change sens de déplacement du rail.

$\Rightarrow$ lorsqu'on déplace le rail, la surface du circuit varie, il apparaît un courant qui crée une force de Laplace qui **s'oppose** au déplacement de la tige.



Lorsqu'un champ magnétique variable traverse une spire, la tension électromotrice induite est proportionnelle au "nombre de lignes de champ" qui traversent la spire.

Conclusion : Il apparaît un courant quand le champ magnétique B_{aimant} à travers le circuit varie.

> Le courant qui apparaît dans le circuit est induit par les variations du champ.

1.2. Nature du phénomène

Le phénomène d'induction consiste en l'apparition d'une tension électromotrice dite induite et s'ils peuvent s'écouler de courants induits dans un circuit électrique soumis à un flux magnétique variable au cours du temps.

On s'intéresse au phénomène d'induction dans des circuits filiformes. On distingue deux cas :

→ Circuit immobile dans $\overrightarrow{B}$ variable : cas de Neumann (IFL3).

→ Circuit mobile dans $\overrightarrow{B}$ permanent : cas de Lorentz (IFL4).

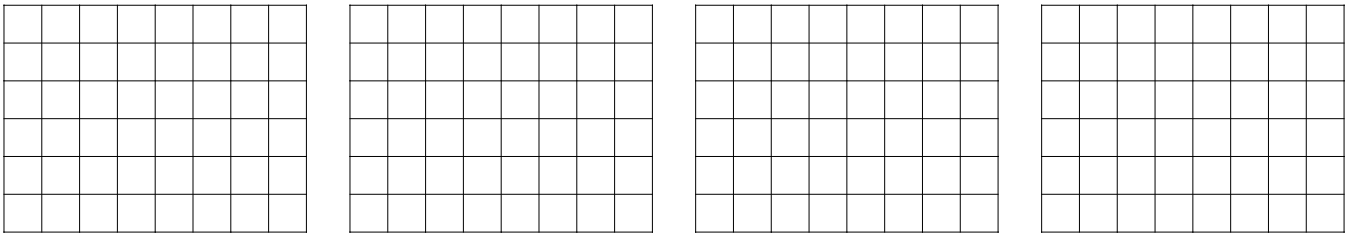
2. Rappel : Flux du champ B à travers le circuit

Lorsqu'une spire baigne dans un champ magnétique, le flux du champ magnétique à travers la spire est défini par :

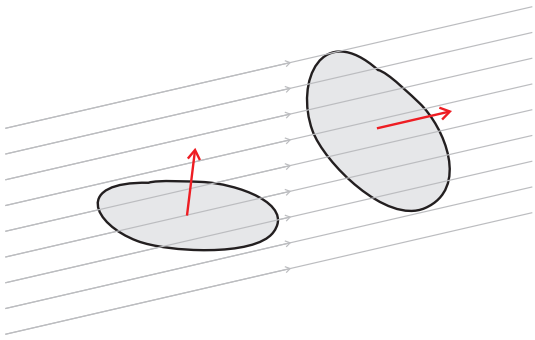
$$\phi = \iint_S \overrightarrow{B} \cdot \mathrm{d}\overrightarrow{S}.$$

Le flux est une grandeur scalaire et algébrique : le flux est positif lorsque le champ a le même sens que la normale à la surface, et est négatif dans le cas contraire.

La normale à la surface est définie par le règle de la main droite après avoir choisi un sens positif au contour sur lequel s'appuie cette surface (en général s'il s'agit d'une spire, on oriente le contour dans le même sens que le courant).

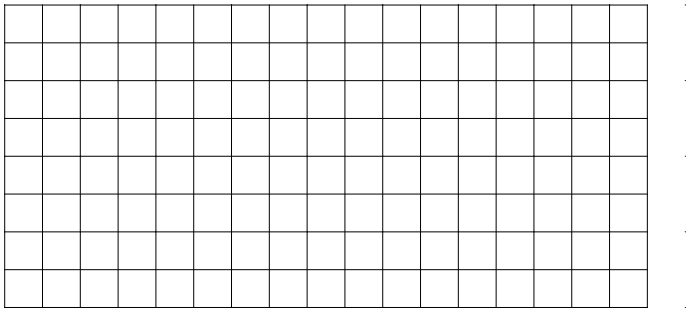


L'unité de flux du champ magnétique est le weber (Wb).

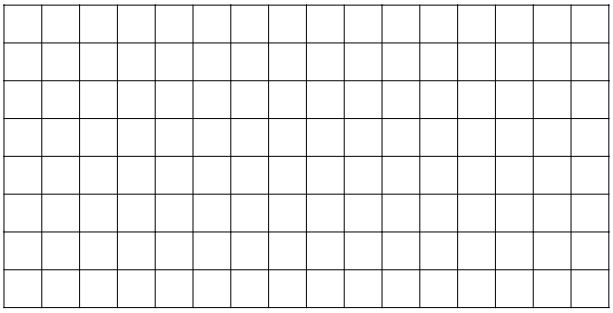


Conservation du flux

Le flux du champ $\overrightarrow{B}$ à travers une surface délimitée par un contour ne dépend que du contour et de la surface considérée.



Cas d'un tube du champ :



3. Loi de Lenz-Faraday - phénomène d'induction

3.1. Loi de Lenz - loi de modération

- On observe un phénomène d'induction magnétique lorsque le flux ϕ à travers un circuit varie au cours du temps avec :
$$\phi = \iint_{\mathcal{S}} \overrightarrow{B} \cdot \mathrm{d}\overrightarrow{S}.$$
- Cette variation peut se faire de trois façons (voir expériences précédentes) :
  - $\rightarrow$ soit par variation du champ magnétique traversant le circuit.
  - $\rightarrow$ soit par variation de la surface.
  - $\rightarrow$ soit par variation de l'angle entre le champ magnétique et la surface.

- Le courant traversant le circuit est appelé **courant induit** et le circuit, **circuit induit**. Si le champ magnétique à l'origine du phénomène d'induction est un circuit, celui-ci est appelé **circuit inducteur**.

- **Un courant induit apparaît si le circuit induit est fermé, une tension électromotrice induite apparaît si le circuit induit est ouvert.**

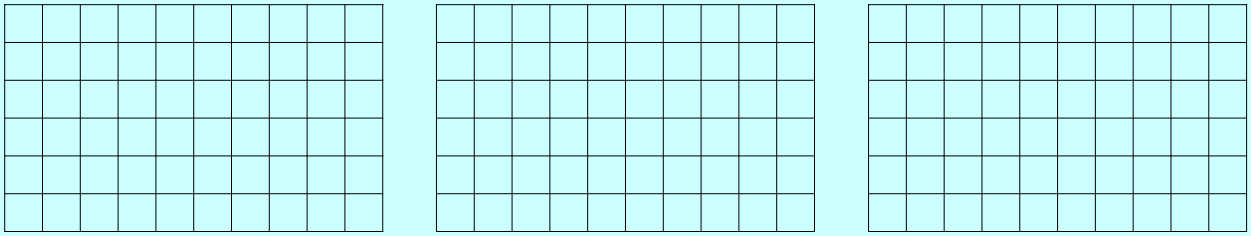
- **Loi de modération :**

L'interprétation du phénomène d'induction peut se faire par la loi de modération :

On considère un système en équilibre caractérisé par une grandeur physique. Lorsque le système est soumis à un sollicitation extérieure, la grandeur physique est amenée à varier. La variation de cette grandeur physique tend à ramener le système à l'équilibre c'est-à-dire à atténuer la variation initiale.

Application I

Spire soumise à un champ B variable :



Loi

Loi de Lenz :

Le courant induit qui apparaît dans le circuit tend, par le champ qu'il crée, à modérer la variation du flux qui lui a donné naissance.

Autre formulation : le courant induit est tel que par ses effets magnétiques (force, champ) il tend à s'opposer à la cause qui lui a donné naissance.

Cette loi est une loi de modération qui indique que le signe du flux induit à travers le circuit est opposé à la variation du flux inducteur :

$$\phi_{\text{induit}} \cdot \Delta\phi_{\text{inducteur}} < 0$$

3.2. Tension électromotrice induite et Loi de faraday

C'est la loi fondamentale de l'induction. Elle s'applique à un circuit défini par une courbe $\mathcal{C}$ orientée fermée.

Loi

Loi de Faraday :
Dans un circuit électrique fermé soumis à un flux magnétique $\phi = \iint \overrightarrow{B}.\mathrm{d}\overrightarrow{S}$ variable au cours du temps, il y a apparition d'un courant induit d'intensité égale à celle que produirait une source de tension idéale :

$$e = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$

Rq

La tension électromotrice induite tém est très souvent appelée force électromotrice induite (fém). On rencontre ce terme dans la plupart des énoncés d'exercices ou de problèmes et dans la plupart des ouvrages.

Le flux ϕ à travers $\mathcal{S}$ s'appuyant sur un contour fermé $\mathcal{C}$ ne dépend que de $\mathcal{C}$ (flux conservatif).

$\rightarrow$ e est bien proportionnelle à la variation du flux.

$\rightarrow$ le signe de e est opposé à celui de la dérivée du flux : une diminution du flux provoque l'apparition d'un courant induit dans le sens positif d'orientation contribuant ainsi par le champ qu'il crée à modérer cette variation.

Convention de signe :

Une fois le circuit orienté arbitrairement, il faut calculer le flux avec le signe exact, puis placer dans le schéma électrocinétique équivalent un générateur de tension : $e = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$ orienté dans le sens de la maille.

On se place toujours en convention générateur : la tém e est toujours dans le même sens que le courant i.

3.3. Importance technologique des phénomènes d'induction électromagnétique

De très nombreuses applications existent dans la vie de tous les jours et le monde industriel :

* Frein à courants de Foucault.
* Four et plaque à induction.
* Train à lévitation magnétique.
* Haut-parleur, microphone.

A cela, nous pouvons aussi ajouter l'essentiel des réalisations électrotechniques de transformation et de transport de l'énergie électrique :

* Transformateurs : conversion énergie électrique $\leftrightarrow$ énergie électrique.
* Moteurs/alternateurs : conversion électromécanique.

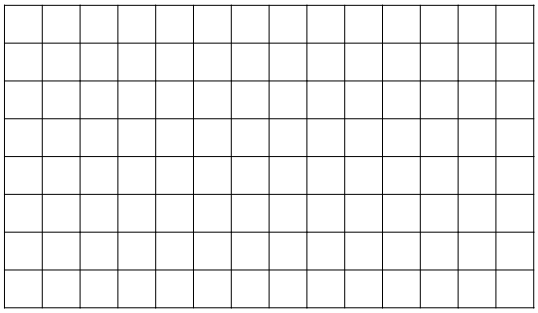
4. Circuit fixe dans un champ magnétique variable

En raison du phénomène d'induction, il apparaît dans les circuits des tém induites liées à l'interaction électromagnétique ; il en résulte un couplage entre les circuits. Ce couplage s'exprime en fonction de coefficients géométriques appelés inductances mutuelles et inductances propres des circuits.

4.1. Induction propre

4.1.1. Inductance d'un circuit

On considère un circuit filiforme fermé et orienté parcouru par un courant d'intensité $i(t)$. L'orientation du circuit impose le sens de la normale (règle de la main droite).
Le champ magnétique $\overrightarrow{B}$ créé est proportionnel à l'intensité i (le milieu est supposé linéaire).
Ici, le courant qui parcourt le circuit est à l'origine du champ B et donc du flux qui traverse le circuit. Ce flux est appelé **flux propre** Φ_p.



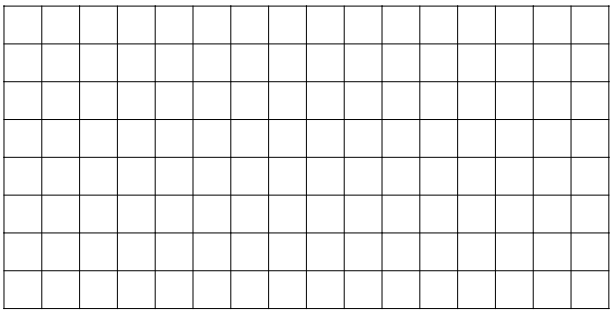
Le coefficient de proportionnalité est l'inductance du circuit.

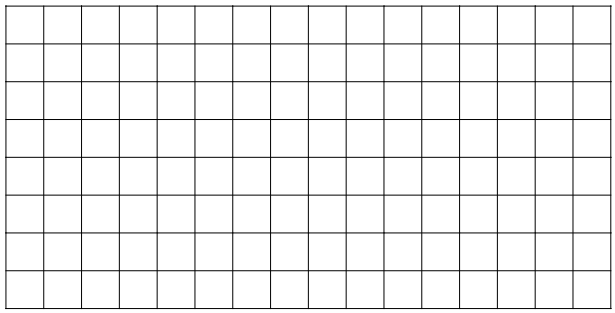
Définition

L : **coefficient d'auto-induction du circuit ou inductance propre**. $L > 0$:

$$\Phi_p = L.i \qquad L \text{ en Henry.}$$

L dépend de la nature du milieu, et de la géométrie du circuit.

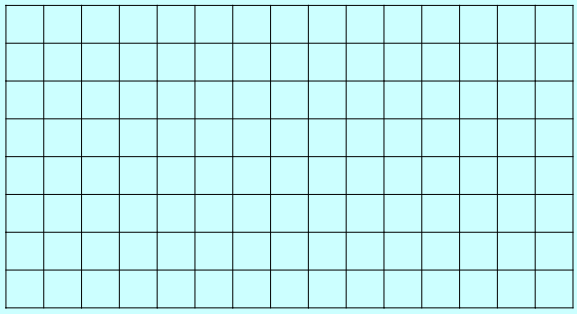




IFL3

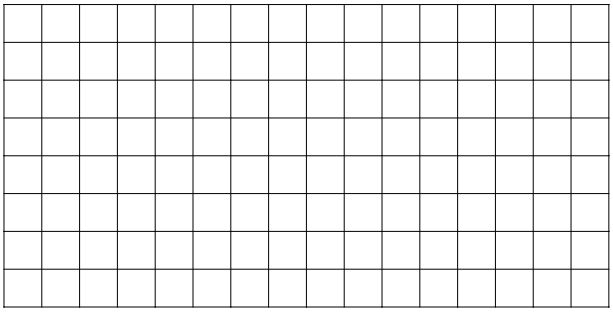
Application 2

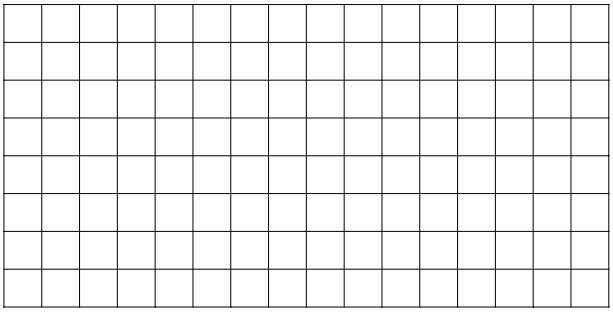
Inductance d'un bobinage en forme de solénoïde



4.1.2. Phénomène d'autoinduction et circuit électrique équivalent

Les éventuelles variations de l'intensité $i(t)$ ont pour conséquences celles du flux propre. Si le circuit est seul (ou s'il n'y a aucune autre cause de variation du champ magnétique), il apparaît une tension électromotrice induite. On parle d'induction propre puisque le phénomène prend cause et effet dans le même circuit.



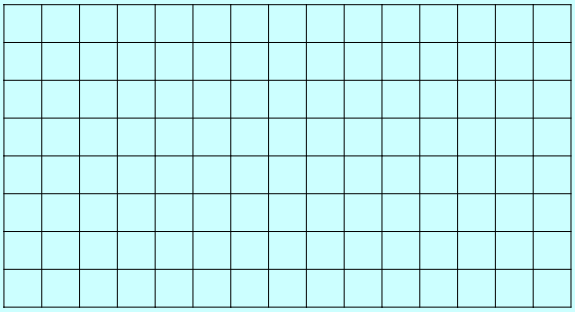


4.1.3. Etude énergétique

De l'énergie magnétique est emmagasinée partout où règne un champ magnétique

Application 3

Energie emmagasinée par une bobine

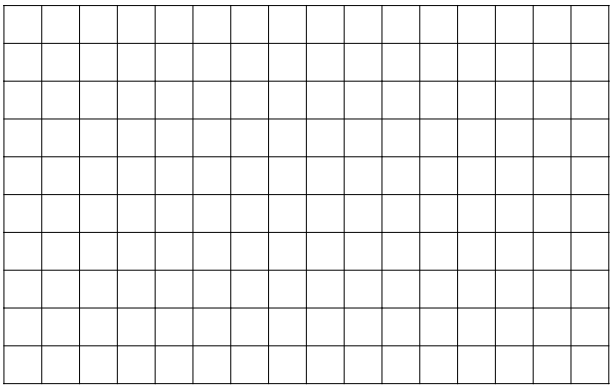


Généralisation du résultat précédent : densité volumique d'énergie magnétique :

$$u_m = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

4.2. Induction mutuelle

4.2.1. Phénomène de couplage magnétique



Lorsque deux circuits $\mathcal{C}_1$ et $\mathcal{C}_2$ sont en présence, le champ magnétique régnant en tout point de l'espace est la somme des champs créés par chacun des circuits.

$$\overrightarrow{B} = \overrightarrow{B_1} + \overrightarrow{B_2}$$

- Soient deux circuits filiformes $\mathcal{C}_1$ et $\mathcal{C}_2$.

$\rightarrow$ Le courant circulant dans $\mathcal{C}_1$ d'intensité I_1 crée un champ magnétique $\overrightarrow{B_1}(M)$ proportionnel à I_1.

$\rightarrow$ Le courant circulant dans $\mathcal{C}_2$ d'intensité I_2 crée un champ magnétique $\overrightarrow{B_2}(M)$ proportionnel à I_2.

Le flux magnétique Φ_{12} noté aussi $\Phi_{1\rightarrow 2}$: flux de B_1 à travers le circuit 2 a pour expression :

$$\Phi_{12} = \iint_{S/\mathcal{C}_2} \overrightarrow{B}_1.\overrightarrow{\mathrm{d}S}$$

Φ_{12} est donc proportionnel à i_1, par définition on appelle M_{12} le rapport de Φ_{12} sur i_1.

$$\Phi_{12} = M_{12}.i_1$$

De même le flux magnétique $\Phi_{21} = \Phi_{2\rightarrow 1}$: flux de B_2 à travers le circuit 1 a pour expression :

$$\Phi_{21} = \iint_{S/\mathcal{C}_1} \overrightarrow{B}_2.\overrightarrow{\mathrm{d}S}$$

Φ_{21} est donc proportionnel à i_2, par définition on appelle M_{21} le rapport de Φ_{21} sur i_2.

$$\Phi_{21} = M_{21}.i_2$$

- On montre que : $M_{12} = M_{21} = M$ avec M : **coefficient d'inductance mutuelle** ou inductance mutuelle des deux circuits $\mathcal{C}_1$ et $\mathcal{C}_2$.

  * M dépend des orientations choisies pour les circuits $\mathcal{C}_1$ et $\mathcal{C}_2$. $\Rightarrow$ M est une grandeur algébrique $M > 0$ ou $M < 0$.

  * M s'exprime en Henry comme les inductances.

Les flux magnétiques envoyés réciproquement par un circuit $\mathcal{C}_1$ et un circuit $\mathcal{C}_2$ l'un à travers l'autre sont donnés par :

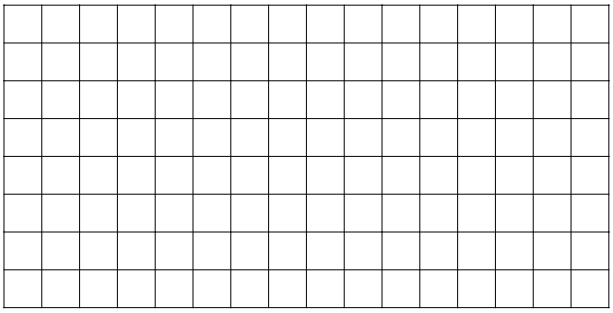
$$\Phi_{1\rightarrow 2} = M.i_1 \qquad \text{et} \qquad \Phi_{2\rightarrow 1} = M.i_2$$

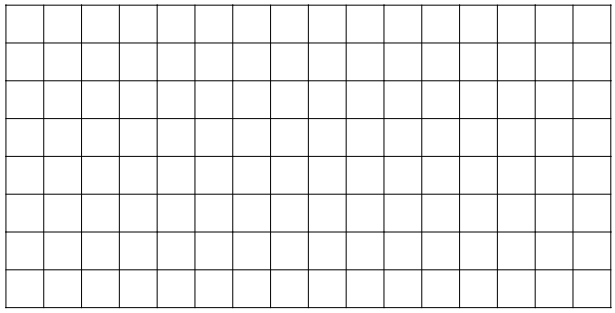
où M est l'inductance mutuelle entre les deux circuits $\mathcal{C}_1$ et $\mathcal{C}_2$. L'inductance mutuelle s'exprime en henry.

Application 4

Couplage entre deux spires coaxiales

4.2.2. Circuit électriques et équations couplées





4.2.3. Etude harmonique

4.2.4. Aspect énergétique

On définit le coefficient de couplage entre deux circuits :

$$k = \frac{|M|}{\sqrt{L_1 L_2}} \qquad 0 \leq k \leq 1$$

$k = 0$: les circuits ne sont pas couplés. (bobines infiniment éloignées).
$k = 1$: les circuits sont parfaitement couplés.

5. Le transformateur

Définition

Un transformateur est un convertisseur statique alternatif/alternatif.

Le transformateur est une machine robuste qui assure cette conversion avec un excellent rendement. Le transfert d'énergie est assuré par un circuit magnétique entre les deux circuit électriques.

→ Isolation galvanique : pas de contact électrique entre les circuit électriques primaire et secondaire.
→ Modification de la valeur efficace d'une tension sans en changer la fréquence.

5.1. Constitution

Un transformateur est un quadripôle constitué de deux enroulements bobinés autour d'un circuit magnétique.

- **Circuit magnétique :**

  Le circuit magnétique est traversé par un champ magnétique variable. Il est le siège de pertes magnétiques :
  → pertes par courants de Foucault (on limite ces pertes en utilisant des tôles feuilletées).
  → pertes par hystérésis : on limite ces pertes en utilisant de l'acier au silicium.

- **Enroulements :**

  Les deux enroulements sont bobinés sur les noyaux, ils ne sont pas séparés mais au contraire enchevêtrés l'un dans l'autre pour réduire au mieux les fuites magnétiques.
  → l'enroulement inducteur est alimenté par une tension alternative (souvent sinusoïdale) et se comporte comme un récepteur. C'est le primaire.
  → L'enroulement induit (qui présente souvent un nombre de spires différent du primaire) se comporte comme un générateur. C'est le secondaire.

Transformateur toroïdal

Transformateur $20\ \text{kV}\ /\ 380\ \text{V}$

5.2. Le transformateur parfait

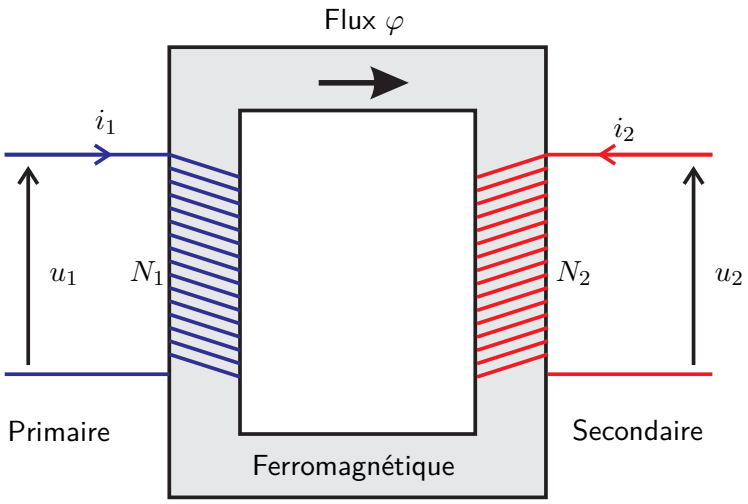
- **Hypothèses :** Un transformateur parfait est un transformateur dans lequel on néglige :

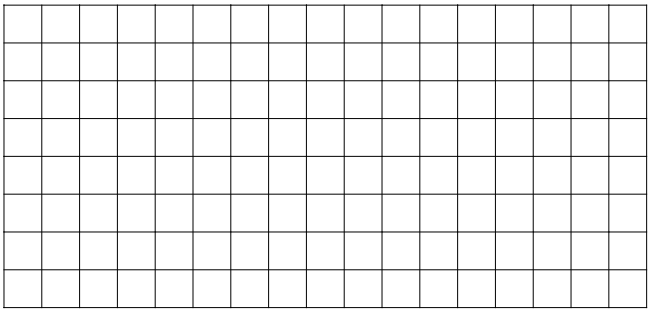
  → les pertes par effet Joule dans les enroulements.

  → les pertes magnétiques dans le fer (hystérésis et courants de Foucault).

  → les fuites magnétiques des lignes de champ.

  → on suppose de plus que le milieu magnétique est parfait $\mu_{\text{fer}} = \infty$.





Le couplage total de deux circuits bobinés est obtenu lorsque toutes les lignes de champ traversant un des spires traverse toutes les autres. Les inductances vérifient alors $L_1 L_2 = M^2$.

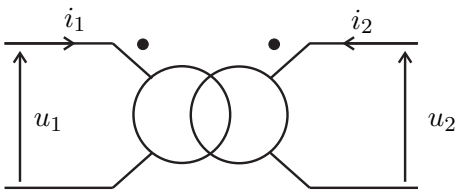
Les tensions primaire et secondaire, dans un transformateur en régime alternatif, sont reliées par le rapport de transformation m :

$$\frac{u_2(t)}{u_1(t)} = \frac{N_2}{N_1} = m$$

Un transformateur ne laisse pas passer le continu : le flux est alors constant, sa dérivée temporelle est donc nulle. la tesion induite au secondaire est donc aussi nulle.

Un transformateur idéal peut être représenté par le symbole suivant.

Le symbole simple est insuffisant pour caractériser entièrement le transformateur : le sens des bobinages détermine le sens du champ magnétique créé et donc les polarités instantanées des tensions induites.
Les bornes repérées par un point • sont appelées bornes homologues. Un courant positif entrant par une borne homologue crée un flux positif dans le circuit magnétique.



Rq

Bornes homologues :
Les courants entrant par les bornes homologues créent un flux positif dans le circuit magnétique. Les tensions qui pointent vers les bornes homologues sont de même polarité : elles sont en phase.

Dans un transformateur, si les 2 courants pointent vers les bornes homologues, ils seront en opposition de phase (Bilan de puissance).

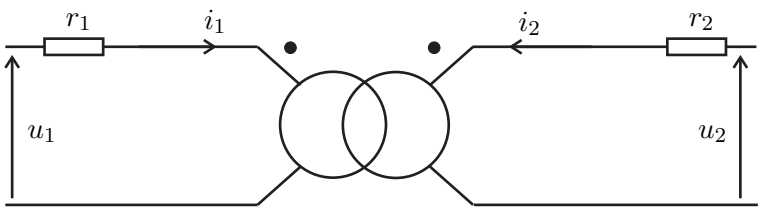
Application 5

Transformation d'impédance

5.3. Le transformateur réel

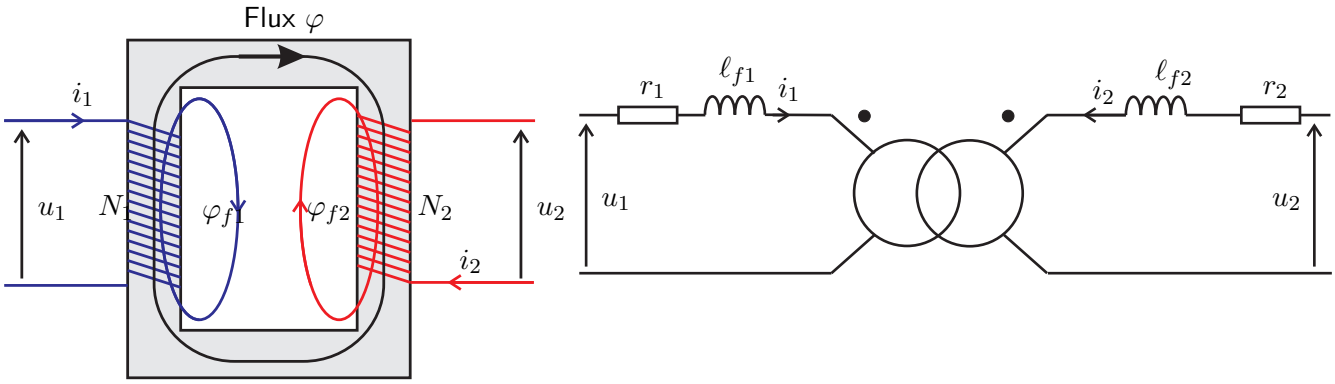
Objectif : Faire un schéma équivalent d'un transformateur réel en prenant en compte les différentes pertes et défauts rencontrés.

- **Résistance des enroulements :**



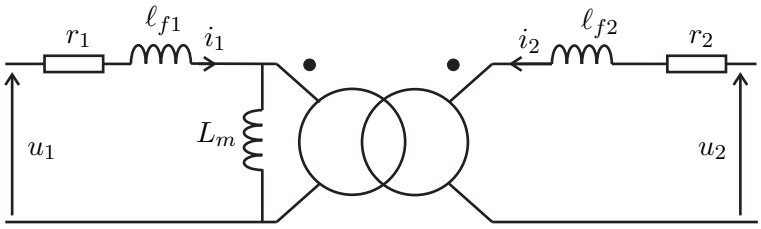
- **Fuites magnétiques :**

Toutes les lignes de champ qui traversent le primaire ne traversent pas le secondaire, et réciproquement.



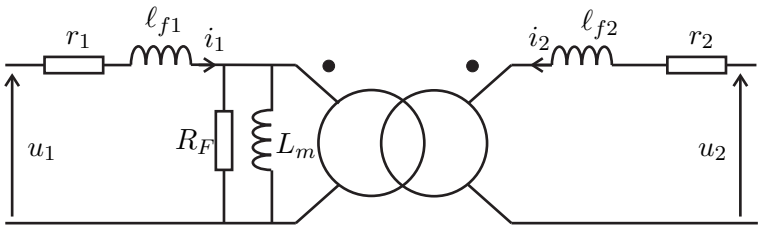
- **Influence de la perméabilité du milieu :**

A vide ($i_2 = 0$), un courant i_{10} est absorbé au primaire. Ce courant assure la "production" du flux et est appelé courant magnétisant. Ce courant magnétisant est d'autant plus petit que la perméabilité du milieu est élevée (pour le fer μ_r est de l'ordre de 5000 à 8000).
Ce courant est en quadrature retard sur la tension v_1

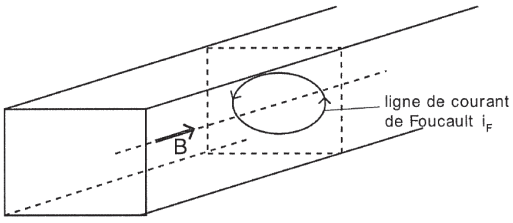


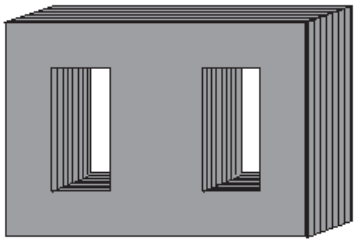
- **Influence des pertes fer :**

Les pertes fer regroupent les pertes par hystérésis et les pertes par courants de Foucault. Ces pertes sont présentes dès qu'une tension est appliquée à l'enroulement primaire. On peut les modéliser par une résistance R_F en parallèle avec L_m. R_F dépend de la dimension du circuit magnétique.



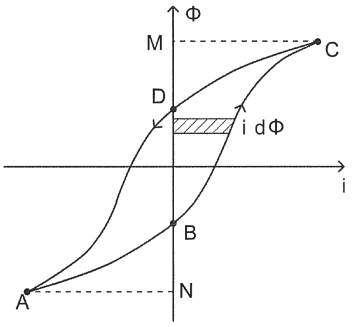
Les courants de Foucault sont des courants induits dans le matériau ferromagnétique par le champ magnétique variable. Ils sont alors à l'origine de perte Joule. Pour diminuer ces courants de foucault, on utilise des tôles feuilletées.

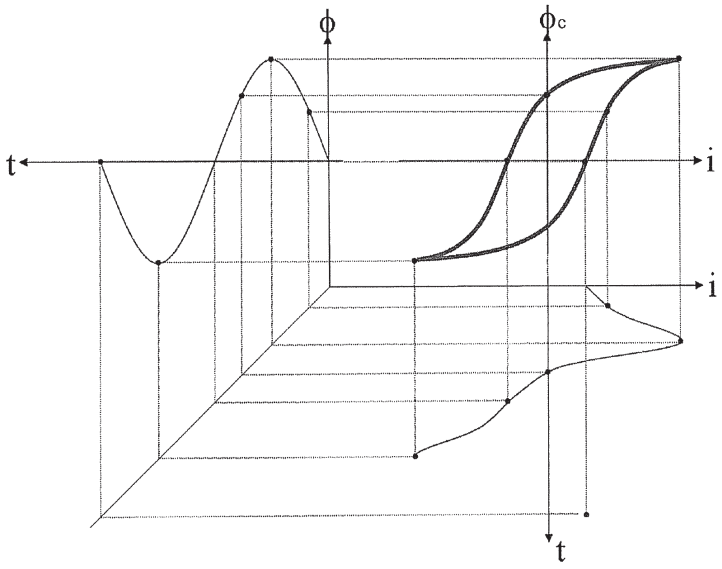




Le circuit magnétique du transformateur n'est pas parfait : il présente des phénomènes de saturation et d'hystérésis. Ces phénomènes entraînent un fonctionnement non linéaire du transformateur qui se traduit par un **courant magnétisant non sinusoïdal** bien que la tension primaire soit sinusoïdale.

Les pertes par hystérésis sont difficiles à prendre en compte car elles sont dues à des phénomènes non linéaires.

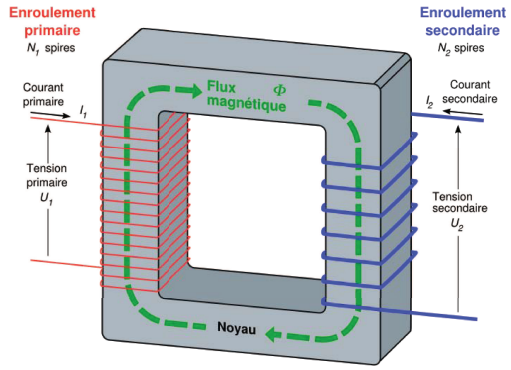




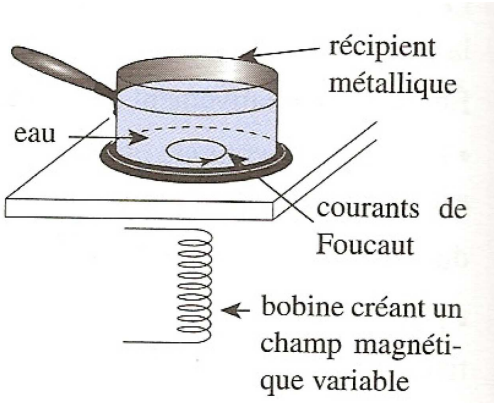
- **Bilan de puissance :**

5.4. Courants de Foucault

Dans un circuit filiforme, les courants induits sont bien définis. Dans un conducteur volumique, les courants induits circulent dans la masse du conducteur : ce sont les **courants de Foucault**. Un matériau soumis à un champ magnétique variable est le siège de courants de Foucault. Ces courants entraînent une perte d'énergie par effet Joule et donc un échauffement du matériau d'autant plus important que la fréquence est élevée.



Dans les transformateurs, on souhaite minimiser les courants de Foucault pour minimiser les pertes (Pertes Fer) : on choisit alors un noyau ferromagnétique en tôles feuilletées pour canaliser le flux.



Les courants de Foucault sont à l'origine du principe du chauffage par induction : en effet les courants induits par un champ magnétique variable permettent un chauffage direct de la casserole et minimisent ainsi les pertes. La fréquence doit être optimisée pour que les intensités soient importantes et que les courants pénètrent dans la masse (épaisseur de peau suffisante).

$$u_1 = L_1 \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + M \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}$$

$$u_2 = L_2 \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} + M \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}$$