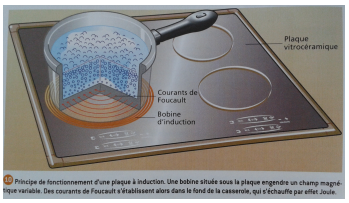
Thème I. Ondes et signaux (Induction)

Chapitre n°24 Induction dans un circuit fixe dans un champ magnétique qui dépend du temps

À gauche, un transformateur qui permet de ramener une tension de 400 kV efficace utilisée pour le transport de l'électricité à une tension de 230 V efficace délivrée dans les habitations.
À droite, une plaque à induction qui utilise le phénomène d'induction pour produire de la chaleur par effet Joule.



Pré-requis

- PCSI. Thème I ; Ondes et signaux
  - Electricité : Chapitres n°3 & n°4 & n°5 & n°6 & n°7
  - Chapitre n°21. Champ magnétique.
  - Chapitre n°23. Lois de l'induction.

Objectifs du chapitre

Introduction : Dans le chapitre précédent nous avons identifié la cause de l'apparition de phénomène d'induction dans un circuit fermé : il s'agit de la variation au cours du temps du flux magnétique à travers une surface qui s'appuie sur ce circuit. Et nous avons distingué deux cas particuliers de systèmes sièges de phénomènes d'induction. Ce chapitre est consacré à l'étude de l'**induction de Neumann** : on s'intéresse à un **circuit fixe et rigide dans le référentiel d'étude**, soumis à un **champ magnétique extérieur qui dépend du temps**.

Buts de ce chapitre :

✓ introduire la notion de flux propre, d'inductance propre et d'inductance mutuelle ;

✓ utiliser des modèles électrocinétiques équivalents pour effectuer un bilan d'énergie ou établir un système d'équations.

Plan du cours

I Auto-induction **3**
I.1 Flux propre 3
I.2 Inductance propre 3
I.3 Circuit électrique équivalent 4
I.4 Étude énergétique 5

II Deux circuits en interaction **6**
II.1 Inductance mutuelle 6
II.2 Circuits couplés par inductance mutuelle 7
II.3 Étude énergétique 8

III Méthode générale **9**

IV Transformateur **10**
IV.1 Présentation 10
IV.2 Loi des tensions 10

V Applications **11**

Ai-je bien appris mon cours ?

1 – ☺– ☹– Définir le champ magnétique propre et le flux propre.

2 – ☺– ☹– Définir l'inductance propre d'un circuit. Quelle en est son signe ? son unité ?

3 – ☺– ☹– Qu'appelle-t-on auto-induction ?

4 – ☺– ☹– Établir l'expression de l'inductance propre d'une bobine longue. Comment dépend-elle du nombre de spire ?

5 – ☺– ☹– Donner les ordres de grandeurs de l'inductance propre d'une bobine longue.

6 – ☺– ☹– Établir le bilan de puissance d'un circuit siège d'un phénomène d'auto-induction.

7 – ☺– ☹– Définir l'inductance mutuelle entre deux circuits. Quelle est son unité ? De quoi dépendent sa valeur et son signe ?

8 – ☺– ☹– Établir l'expression de l'inductance mutuelle entre deux bobines longues de même axe et en influence totale.

9 – ☺– ☹– Établir le système d'équations en régime sinusoïdal forcé pour deux circuits couplés par inductance mutuelle.

10 – ☺– ☹– Effectuer un bilan de puissance et d'énergie dans un système de deux circuits couplés par induction mutuelle.

11 – ☺– ☹– Citer des applications de l'induction mutuelle entre deux bobines.

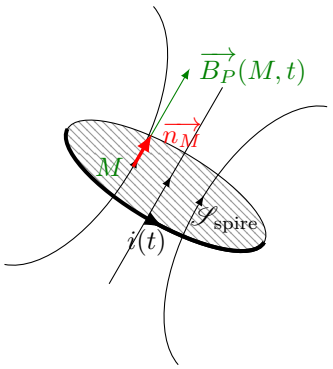
12 – ☺– ☹– Décrire ce qu'est un transformateur, et en citer des applications.

13 – ☺– ☹– Établir la loi des tensions d'un transformateur de tension.

I Auto-induction

I.1 Flux propre

On considère une spire plane parcoure par un courant i. On a vu au chapitre 23, que le courant électrique i crée un champ magnétique, appelé **champ propre**, noté $\overrightarrow{B_P}$. Les lignes du champ $\overrightarrow{B_P}$ traversent le circuit qui lui a donné naissance.



Définition : Flux propre

Le **flux propre** est le flux du champ magnétique propre à travers le circuit qui lui a donné naissance.

Capacité exigible : **Différencier le flux propre des flux extérieurs.**

Attention : Flux propre / Flux extérieur

Il faut bien **distinguer** :

- le **champ propre** qui est le champ créé par le courant qui circule dans le circuit étudié lui-même ;
- le **champ extérieur** qui est le champ créé par un système extérieur au circuit étudié.

Il faut bien **distinguer** :

- le **flux propre** du champ propre à travers le circuit lui-même.
- le **flux extérieur** du champ extérieur à travers le circuit.

Le **flux total** qui traverse le circuit est égal à la somme du flux propre et des flux extérieurs :

$$\boxed{\varphi_{\text{tot}} = \varphi_P + \varphi_{\text{ext}}}$$

I.2 Inductance propre

Le **champ magnétique propre** $\overrightarrow{B_P}(M,t)$ **est proportionnel** en tous points **au courant électrique** $i(t)$ **qui lui a donné naissance**. Ainsi le **flux propre** φ_P du champ magnétique propre $\overrightarrow{B_P}$ à travers le circuit qui lui a donné naissance est **proportionnel à l'intensité du courant qui lui a donné naissance**.

À retenir : Inductance propre

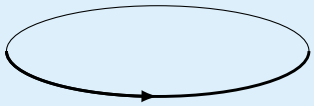
On définit l'**inductance propre** ou **auto-inductance**, notée L, comme étant la **constante de proportionnalité positive entre l'intensité du courant et le flux propre** :

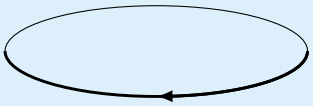
$$\varphi_P(t) = L \times i(t)$$

L s'exprime en **henry (H)**, et dépend de la forme du circuit.

Activité n°1 – Signe de L

Placer ci-dessous le champ propre et le vecteur surface. Déterminer le signe de φ_P. Conclure sur le signe de L.


$i > 0$


$i' = -i < 0$

Capacité exigible : **Évaluer et citer l'ordre de grandeur de l'inductance propre d'une bobine de grande longueur.**

Méthode : Évaluer l'inductance propre d'une bobine longue

1. Orienter le circuit (comme dans tout exercice d'induction !)
2. Exprimer le champ magnétique propre $\overrightarrow{B_P}$ créé par une telle bobine.
3. Exprimer le flux $\varphi_{1\text{ spire}}$ du champ à travers une spire de la bobine.
4. En déduire le flux propre φ_P du champ magnétique propre à travers les N spires de la bobine : $\varphi_P = N \times \varphi_{1\text{ spire}}$.
5. En déduire l'expression, puis la valeur, de l'inductance propre L telle que $\varphi_P = Li$.

Démonstration à maîtriser n°2 – Inductance propre d'une bobine longue

On considère une bobine longue de longueur ℓ, constituée de N spires de rayon a et parcourue par un courant d'intensité i. On rappelle l'expression du champ magnétique propre créé par la bobine : $\overrightarrow{B_p} = \mu_0 \frac{N}{\ell} i \overrightarrow{u_z}$, avec $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ H · m^{-1}. Il est uniforme dans la bobine et nul à l'extérieur.

Q1. Faire un schéma et orienter le circuit. Indiquer notamment le vecteur surface $\overrightarrow{S}$ d'une spire de la bobine.

Q2. Exprimer le flux du champ magnétique propre à travers une spire de la bobine.

Q3. En déduire le flux propre à travers les N spires de la bobine.

Q4. En déduire l'expression de l'inductance propre. On pourra faire apparaître le nombre de spires par unité de longueur n et le volume V de la bobine. Vérifier l'homogénéité.

Q5. Faire l'application numérique pour : $N = 1000$; $a = 1$ cm ; $\ell = 10$ cm.

I.3 Circuit électrique équivalent

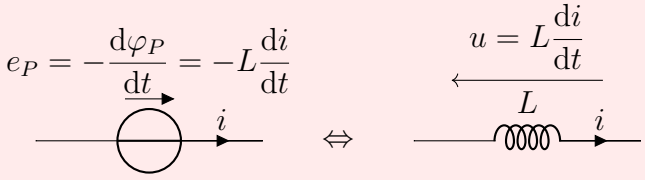
Tout circuit traversé par un courant d'intensité $i(t)$ dépendant du temps donne naissance au champ magnétique propre $\overrightarrow{B_P}$, et donc à un flux propre $\varphi_P(t) = Li(t)$ à travers le circuit qui dépend du temps. Il se produit alors un phénomène d'induction, appelé **auto-induction** : la variation du flux propre donne naissance à un courant qui s'oppose à la modification du flux propre. Ce courant est celui que fournirait un générateur de fem donnée par la loi de Faraday. Le force électromotrice induite s'appelle alors la **fem auto-induite**, qui s'exprime à l'aide de la loi de Faraday.

À retenir : Phénomène d'auto-induction et f.e.m. auto-induite

Tout circuit traversé par un courant d'intensité i dépendant du temps est siège d'un **phénomène d'auto-induction**. Il faut alors **ajouter dans le circuit électrique étudié un générateur fictif** (auto-induit) de **fem auto-induite** donnée par la **loi de Faraday** :

$$e_P = -\frac{\mathrm{d}\varphi_P}{\mathrm{d}t} = -L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

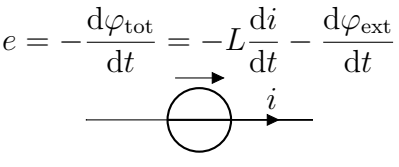
orientée en convention générateur avec le courant i.



Si le circuit est de plus plongé dans un champ magnétique extérieur $\overrightarrow{B_{\text{ext}}}$ variable, il faut alors ajouter le flux extérieur supplémentaire : $\varphi_{\text{tot}} = \varphi_P + \varphi_{\text{ext}}$

La fem induite dans le circuit s'écrit alors :

$$e = -\frac{\mathrm{d}\varphi_{\text{tot}}}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}\varphi_P}{\mathrm{d}t} - \frac{\mathrm{d}\varphi_{\text{ext}}}{\mathrm{d}t} = -L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} - \frac{\mathrm{d}\varphi_{\text{ext}}}{\mathrm{d}t}$$



REMARQUES

Tout circuit parcouru par un courant variable est le siège d'un phénomène d'auto-induction et on devrait ajouter une fem auto-induite dans tous les circuits.
En pratique, cette fem auto-induite est négligeable dès lors que le circuit n'est constitué que d'une seule spire, car L est très faible dans ce cas-là. C'est le cas des circuits étudiés cette année en l'absence de bobine.
Dans le cas où une bobine constituée d'un grand nombre de spires est présente dans le circuit, il faut prendre en compte l'auto-induction, car $L \propto N^2$ n'est pas négligeable dans ce cas-là.

Méthode : Étude d'un circuit siège d'un phénomène d'auto-induction

Pour étudier un circuit filiforme fixe placé dans un champ magnétique dépendant du temps, il faut :

1. Orienter le circuit (choix du sens de la flèche de i).
2. Exprimer le flux du champ magnétique (en distinguant le flux propre φ_P et le flux extérieur φ_{ext}).
3. Exprimer la fem induite e ($e = e_p + e_{\text{ext}}$) en utilisant la loi de Faraday.
4. Représenter le schéma électrique équivalent, constitué des éléments réellement présents dedans (résistances, GBF, condensateurs, ...) auxquels on ajoute la fem induite en convention générateur par rapport à i.
5. Établir l'équation électrique en utilisant la loi des mailles.

Capacité exigible : **Utiliser la loi de modération de Lenz.**

Activité n°3 –

On considère une bobine alimentée par un générateur de fem constante E à travers une résistance R. La bobine est d'inductance propre L et de résistance r. À $t = 0$ on ferme l'interrupteur.

Q1. Lors de la fermeture de l'interrupteur, quel phénomène se produit au niveau de la bobine ?

Q2. En suivant la méthode précédente, établir l'équation différentielle vérifiée par i.

Q3. Commenter en lien avec la loi de Lenz.

I.4 Étude énergétique

Capacité exigible : **Réaliser un bilan de puissance et d'énergie dans un système siège d'un phénomène d'auto-induction en s'appuyant sur un schéma électrique équivalent.**

Méthode : Comment réaliser un bilan de puissance et d'énergie ?

Comment réaliser un bilan de puissance ?

1. Représenter le circuit électrique équivalent du circuit siège du phénomène d'auto-induction.
2. Écrire la loi des mailles.
3. Multiplier la loi des mailles par l'intensité i du courant.
4. Interpréter les différents termes.

Comment réaliser un bilan d'énergie ?

5. Multiplier le bilan de puissance par $\mathrm{d}t$, puis l'intégrer sur la durée souhaitée.

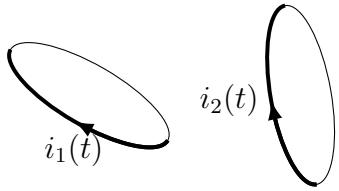
Exercice à maîtriser n°4 – Bilan de puissance

Établir le bilan de puissance du circuit précédent et interpréter les différents termes.

II Deux circuits en interaction

II.1 Inductance mutuelle

On considère deux circuits filiformes $\mathscr{C}_1$ et $\mathscr{C}_2$ parcourus respectivement par un courant d'intensité i_1 et un courant d'intensité i_2. Les lignes de champ du premier circuit traversent le deuxième circuit, et inversement.



- Le circuit $\mathscr{C}_1$ parcouru par le courant $i_1(t)$ crée un champ magnétique $\overrightarrow{B_1}(M,t)$ proportionnel à $i_1(t)$.
  Le circuit $\mathscr{C}_2$ intercepte les lignes de champ de $\overrightarrow{B_1}$.
  Le flux $\varphi_{1\to2}$ de $\overrightarrow{B_1}$ à travers $\mathscr{C}_2$ est proportionnel à l'intensité $i_1(t)$: $\varphi_{1\to2}(t) = M_{12} \times i_1(t)$
- Le circuit $\mathscr{C}_2$ parcouru par le courant $i_2(t)$ crée un champ magnétique $\overrightarrow{B_2}(M,t)$ proportionnel à $i_2(t)$.
  Le circuit $\mathscr{C}_1$ intercepte les lignes de champ de $\overrightarrow{B_2}$.
  Le flux $\varphi_{2\to1}$ de $\overrightarrow{B_2}$ à travers $\mathscr{C}_1$ est proportionnel à l'intensité $i_2(t)$: $\varphi_{2\to1}(t) = M_{21} \times i_2(t)$

Le théorème de Neumann (admis) énonce que les deux coefficients de proportionnalité entre $\varphi_{1\to2}$ et i_1 et entre $\varphi_{2\to1}$ et i_2 sont identiques, leur valeur commune est appelée **inductance mutuelle** .

À retenir : Inductance mutuelle entre deux circuits

On définit l'**inductance mutuelle** (en **henry (H)**) entre les deux circuits $\mathscr{C}_1$ (traversé par $i_1(t)$) et $\mathscr{C}_2$ (traversé par $i_2(t)$), comme étant la constante de proportionnalité entre $\varphi_{1\to2}$ et i_1, et entre $\varphi_{2\to1}$ et i_2 :

— Le flux du champ $\overrightarrow{B_1}$ créé par $\mathscr{C}_1$ à travers $\mathscr{C}_2$ est proportionnel à i_1 :

$$\varphi_{1\to2}(t) = M \times i_1(t)$$

— Le flux du champ $\overrightarrow{B_2}$ créé par $\mathscr{C}_2$ à travers $\mathscr{C}_1$ est proportionnel à i_2 :

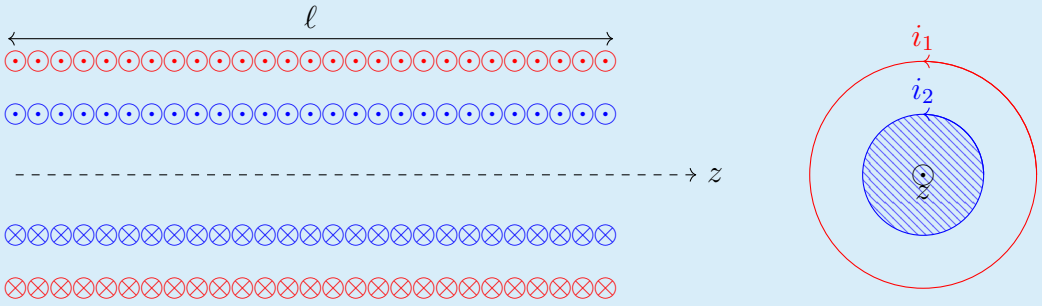
$$\varphi_{2\to1}(t) = M \times i_2(t)$$

M dépend de la géométrie des deux circuits et de leur position relative.
M **peut être positif ou négatif** car son signe est lié à l'orientation relative des deux circuits (les deux orientations sont indépendantes).

Capacité exigible : Déterminer l'inductance mutuelle entre deux bobines de même axe de grande longueur en « influence totale ».

Démonstration à maîtriser n°5 – Inductance mutuelle entre deux bobines

On cherche à établir l'expression de l'inductance mutuelle M entre, une bobine longue de longueur ℓ, constituée de N_1 spires, parcourue par un courant d'intensité i_1, de section S_1, se trouvant à l'intérieur de laquelle se trouve une deuxième bobine longue de même longueur ℓ, constituée de N_2 spires, parcourue par un courant d'intensité i_2, de section S_2.
Les deux bobines sont de mêmes axes et orientées dans le même sens.

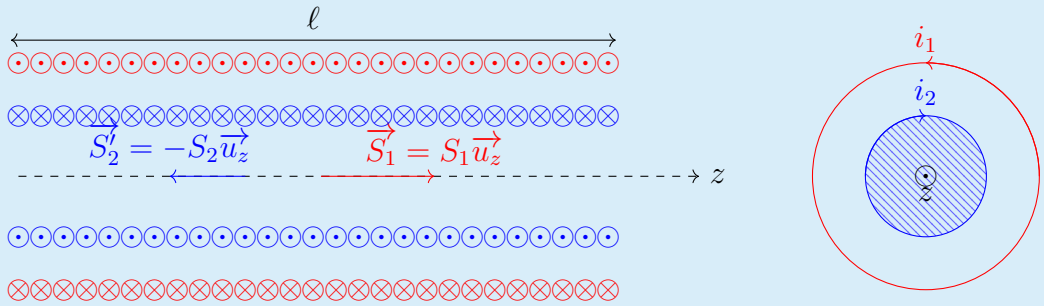


On rappelle que le champ magnétique créé par une bobine longue est nul à l'extérieur de la bobine et est uniforme à l'intérieur : $\overrightarrow{B} = \mu_0 n i \overrightarrow{u_z}$, où n est le nombre de spire par unité de longueur.

Q1. Indiquer les vecteurs surfaces des deux bobines et exprimer le champ créé par chaque bobine.

Q2. Exprimer les flux $\varphi_{1\to2}$ de $\overrightarrow{B_1}$ à travers la deuxième bobine et $\varphi_{2\to1}$ de $\overrightarrow{B_2}$ à travers la première bobine. En déduire l'expression de l'inductance mutuelle.

Q3. On change l'orientation de la deuxième bobine, calculer l'un des deux flux précédents. Quel est la conséquence du changement d'orientation d'une des deux bobines ?



II.2 Circuits couplés par inductance mutuelle

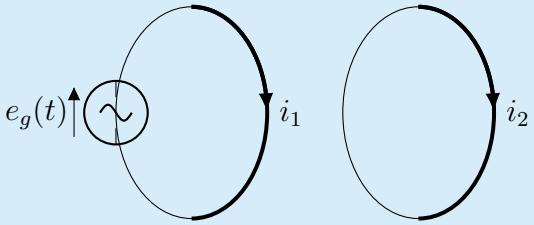
Capacité exigible : Établir le système d'équations en régime sinusoïdal forcé en s'appuyant sur des schémas électriques équivalents.

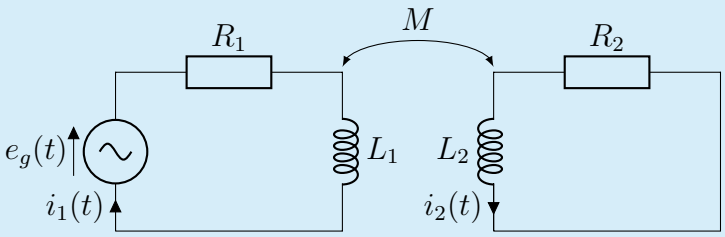
Méthode : Établir le système d'équations de deux circuits couplés.

1. Orienter les deux circuits.
2. Utiliser les définitions des coefficients d'auto-inductance et d'inductance mutuelle pour exprimer les flux totaux à travers chaque circuit : $\phi_{\text{tot}1} = \varphi_{P1} + \varphi_{2\to1}$ et $\phi_{\text{tot}2} = \varphi_{P2} + \varphi_{1\to2}$.
3. Utiliser la loi de Faraday pour exprimer les f.e.m. induites dans chaque circuit.
4. Représenter le circuit électrique équivalent faisant intervenir les f.e.m. induites, en utilisant la convention générateur.
5. Appliquer la loi des mailles dans chaque circuit pour obtenir le système d'équations couplées.

Exercice à maîtriser n°6 – Équations électriques dans les circuits couplés en RSF

On considère l'ensemble des deux circuits couplés par mutuelle induction, on notera M le coefficient d'inductance mutuelle des deux circuits. Le circuit 1, d'inductance propre L_1 et de résistance R_1 est alimenté par un générateur qui impose une tension sinusoïdale $e_g(t) = E\cos(\omega t)$. Le circuit 2 est d'inductance propre L_2 et de résistance R_2.





Q1. Comment peut-il exister un courant dans le deuxième circuit en l'absence de générateur dedans ?

Q2. Exprimer le flux total ϕ_{tot1} à travers le circuit 1 en fonction de L_1, M, i_1 et i_2. En déduire la fem induite dans ce circuit.

Q3. Faire de même dans le circuit 2.

Q4. Représenter le circuit électrique équivalent faisant intervenir les générateurs fictifs.

Q5. Établir le système de deux équations différentielles couplées vérifiées par i_1 et i_2.

Q6. Établir en régime sinusoïdal forcé à la pulsation ω, les équations couplées vérifiées par les amplitudes complexes $\underline{I_{1m}}(\omega)$ et $\underline{I_{2m}}(\omega)$.

Q7. En déduire l'impédance équivalente du montage vue depuis la source de tension e_g. Autrement dit, établir la relation entre E et $\underline{I_{2m}}$.

II.3 Étude énergétique

Capacité exigible : Conduire un bilan de puissance et d'énergie dans un système siège d'un phénomène d'induction mutuelle en s'appuyant sur un schéma électrique équivalent.

Méthode : Comment réaliser un bilan de puissance et d'énergie ?

1. Écrire la loi des mailles pour chacun des deux circuits.
2. Multiplier chaque loi des mailles par l'intensité du courant qui circule dans le circuit concerné.
3. Sommer les deux équations ainsi obtenues.
4. Interpréter.

Pour obtenir le bilan d'énergie :

5. Multiplier le bilan de puissance par $\mathrm{d}t$.
6. Puis intégrer sur la durée souhaitée.

Exercice à maîtriser n°7 – Bilan énergétique

On considère les deux circuits couplés par inductance mutuelle étudiés précédemment.

Q1. Suivre la méthode précédente pour établir le bilan de puissance du système siège d'un phénomène d'induction mutuelle.
Interpréter les différents termes : puissance fournie par le générateur de tension, puissance dissipée par effet Joule et puissance magnétique reçue par le système que l'on reliera à l'énergie magnétique stockée par le système.

Q2. En déduire le bilan d'énergie sur une durée τ.

Q3. Si les signaux sont périodiques de période T, que peut-on dire du bilan d'énergie sur une période ?

III Méthode générale d'étude d'un circuit siège d'un phénomène d'induction

Méthode : Étudier un circuit siège d'un phénomène d'induction

1. Orienter le circuit : préciser le sens choisi pour le courant par une flèche.
2. **Exprimer le flux total** du champ magnétique à travers le circuit

$$\phi_{\text{tot}} = \varphi_P + \varphi_{\text{ext}}$$

Ce flux total inclut :

- le **flux propre**, c'est-à-dire le flux du champ $\overrightarrow{B}$ créé par le circuit à travers le circuit lui-même, qui s'écrit :

$$\varphi_P = L \times i$$

Ce flux propre est négligé si le circuit comporte une seule spire.

- le **flux du champ magnétique imposé par l'extérieur** :
  - Si le circuit est plongé dans $\overrightarrow{B_{\text{ext}}}$:

$$\varphi_{\text{ext}} = \iint_{M\in\mathcal{S}} \overrightarrow{B_{\text{ext}}}(M) \cdot \mathrm{d}\overrightarrow{S_M}$$

Si $\overrightarrow{B_{\text{ext}}}$ est uniforme :

$$\varphi_{\text{ext}} = \overrightarrow{B_{\text{ext}}} \cdot \overrightarrow{S}$$

  - Si le circuit est couplé par induction mutuelle

$$\varphi_{1\to 2} = Mi_1$$

$$\varphi_{2\to 1} = Mi_2$$

3. **Exprimer la fem induite** du générateur fictif, donnée par la **loi de Faraday** :

$$e = -\frac{\mathrm{d}\phi_{\text{tot}}}{\mathrm{d}t}$$

4. **Circuit électrique équivalent** : faire le schéma du circuit électrique équivalent où apparaissent :
   - Les « vrais » dipôles : « vrai » générateur, résistances et condensateurs.
   - Le courant dans le même sens que précédemment.
   - Le générateur fictif de fem induite donnée par la loi de Faraday, en convention générateur.
5. **Établir l'équation électrique** par application de la **loi des mailles.**

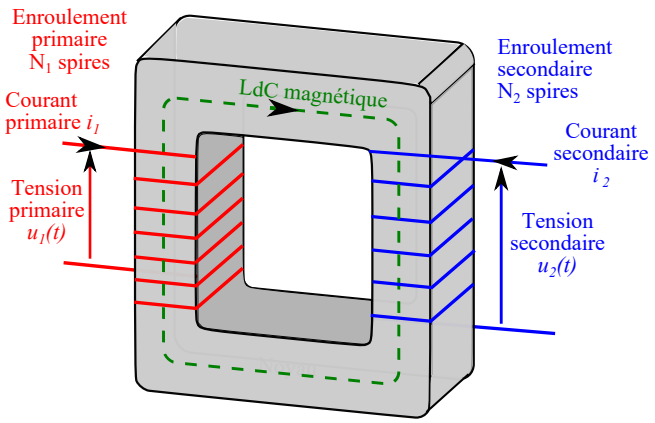
IV Transformateur

Ces notions seront très largement développées dans la partie « conversion de puissance » du programme de PSI.

IV.1 Présentation

Un transformateur est un dispositif qui permet de modifier l'amplitude (ou la valeur efficace) de tensions et de courants alternatif.

Il est constitué d'une **carcasse ferromagnétique** et de deux enroulements. Le matériau ferromagnétique est choisi pour sa capacité à canaliser les lignes de champ magnétique, de même qu'un tuyau canalise un liquide en écoulement. Ainsi, il n'existe de champ magnétique qu'à l'intérieur du « circuit magnétique » formé par le ferromagnétique.
Les enroulements sont constitués de fils de cuivre, bobinés autour du circuit magnétique.
L'**enroulement primaire**, ou primaire, est constitué de N_1 spires identiques, la tension à ses bornes est $u_1(t)$ et est parcouru par un courant d'intensité $i_1(t)$.
L'**enroulement secondaire**, ou secondaire, est constitué de N_2 spires identiques, la tension à ses bornes est $u_2(t)$ et est parcouru par un courant d'intensité $i_2(t)$.



Le cadre ferromagnétique sert à canaliser les lignes de champ magnétique de façon à ce que le flux qui traverse une spire du primaire soit le plus proche possible de celui qui traverse une spire du secondaire. On supposera que le couplage est parfait c'est-à-dire que ces flux sont égaux. On note ϕ le flux traversant une spire, orientée positivement dans le sens de la flèche en pointillé.

À retenir : Principe d'un transformateur

Le primaire, soumis à une tension $u_1(t)$ alternative est parcouru par un courant alternatif d'intensité $i_1(t)$. Ce courant crée un champ magnétique variable $\overrightarrow{B_1}(t)$ dont les lignes de champ sont canalisées par le matériau ferromagnétique. Le champ $\overrightarrow{B_1}(t)$ crée un flux variable à travers le secondaire. Une tension $u_2(t)$ peut alors être récupérée aux bornes du secondaire sans qu'il soit directement alimenté. Si le secondaire est fermé, un courant circule dedans et crée un champ magnétique $\overrightarrow{B_2}$.
Le matériau ferromagnétique canalise un champ magnétique total $\overrightarrow{B}$.

IV.2 Loi des tensions

Capacité exigible : **Établir la loi des tensions du transformateur de tension.**
Le but est ici de relier la tension u_2 au secondaire à la tension u_1 au primaire.

Démonstration à maîtriser n°8 – Loi des tensions d'un transformateur de tension

On notera ϕ le flux du champ magnétique $\overrightarrow{B}$ à travers la section du matériau ferromagnétique.

Q1. Exprimer le flux magnétique φ_1 traversant l'enroulement primaire en fonction de ϕ et N_1. Faire de même pour le flux magnétique φ_2 traversant l'enroulement secondaire.

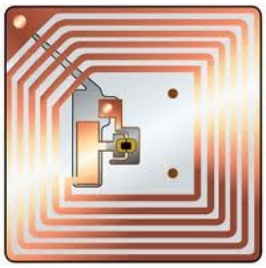
Q2. Calculer les forces électromotrices et dessinez le schéma équivalent.

Q3. En déduire alors la relation entre u_1 et u_2.

Q4. Le primaire est branché sur le secteur américain, à 110 V efficace. On souhaite brancher sur le secondaire un appareil français (fonctionnant donc sur du 220 V efficace).
Comment doit-on choisir le nombre d'enroulements des circuits ?

V Applications

- **Puces RFID : radioidentification**



C'est une méthode permettant la transmission à distance d'informations placées sur de petits marqueurs (étiquettes adhésives, puces sans contact, étiquettes antivol, ...).
Lorsque l'étiquette passe près d'un lecteur, qui est un système actif fournissant un champ magnétique, un courant circule dans le circuit et permet d'alimenter une petite antenne qui peut alors envoyer l'information contenue dans la puce.
Utilisations de puces RFID : Antivols, forfaits de ski, badges de télépéage ...

- **Détecteurs de métaux** : Une bobine crée un champ magnétique et, si un morceau de métal se trouve à proximité, il se crée en son sein un courant. Ce courant crée lui-même un champ magnétique détecté via la f.é.m qui apparaît dans la bobine du détecteur.
- **Boucle magnétique** : Elle se trouve généralement aux feux rouges, ou devant des barrières de parking souterrain. Il s'agit d'une spire conductrice située dans le sol. Quand un véhicule s'arrête sur la boucle, il crée par couplage un courant induit dans la boucle magnétique qui peut ainsi détecter la présence du véhicule.
- **Rechargement par induction** : Pour les brosses à dent, ou plus récemment les téléphones portables, on peut transmettre sans contact l'énergie électrique d'un générateur vers le système à recharger. Chacun est muni d'une bobine.
- **Élévation de tension, lignes à haute tension**

Quel que soit le type de centrale (nucléaire, hydraulique, à charbon, ...), une turbine entraîne un alternateur qui convertit une puissance mécanique (arbre en rotation avec un certain couple disponible) en une puissance électrique. Cette puissance électrique est obtenue sous la forme d'une ou de plusieurs tension(s) alternative(s), de l'ordre de 20 kV. Pour acheminer cette puissance électrique au niveau des agglomérations, on utilise des transformateurs élévateurs de tension, qui élèvent la valeur efficace d'un facteur d'environ 20, le transport se faisant sous 400 kV ou 800 kV pour diminuer les pertes par effet Joule dans les lignes de transport.

Ci-contre : *Transformateurs à la Centrale hydroélectrique Robert-Bourassa, dans le nord du Québec. Ce poste alimente les lignes de transport électrique à 735 kV qui relient le complexe de la Baie-James aux marchés du sud du Québec, sur une distance de 1 500 km*, d'après http://fr.wikipedia.org/wiki/Poste_électrique

- **Abaissement de tension, alimentation des appareils domestiques**

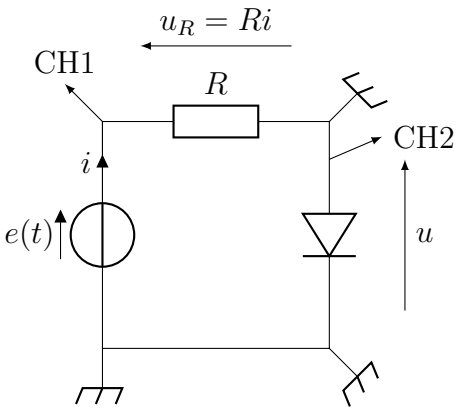
À l'approche des agglomérations, des transformateurs abaissent la tension, pour finalement délivrer la tension usuelle de 230 V efficace.
Un grand nombre d'appareils électriques usuels (ordinateur, téléphone portable, ...) nécessite une tension d'alimentation de l'ordre de quelques dizaines de volts. La tension du secteur est donc rarement adaptée au fonctionnement des appareils. Un premier étage de l'alimentation comprend donc un transformateur abaisseur de tension, avec un rapport de nombre de spires entre le secondaire et le primaire de l'ordre de 1/20 à 1/100.
Les appareils fonctionnant sur batterie nécessitent une tension continue, après le transformateur, un redresseur permet de délivrer une tension continue à partir d'une tension sinusoïdale (en sortie du transformateur).

Transformateur en 230 V

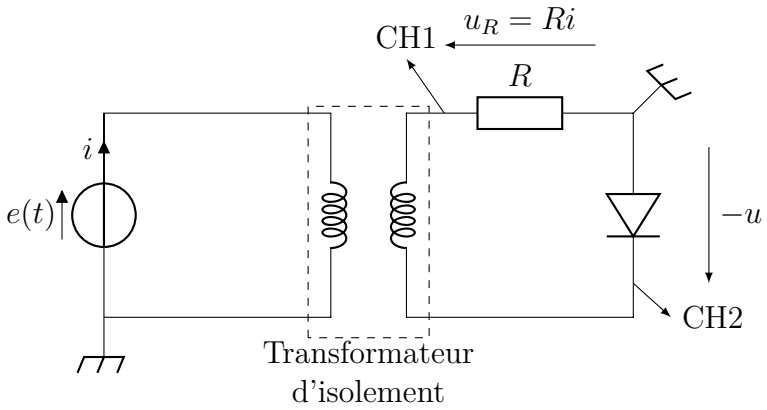
■ Transformateurs d'isolement

Lorsque l'on souhaite visualiser la caractéristique d'un dipôle à l'oscilloscope il est nécessaire de visualiser la tension aux bornes du dipôle et la tension aux bornes d'une résistance afin de visualiser une image de l'intensité du courant.

Le circuit ci-contre n'est pas possible à réaliser car il y a deux masses ce qui court-circuite la diode.



Une solution consiste à placer un transformateur de rapport 1 entre le GBF et le reste du circuit à alimenter. De cette façon, le GBF, via le transformateur, applique une tension (variable) à l'association en série de la diode et du résistor. On peut alors placer dans le circuit secondaire une masse à l'endroit souhaité, il n'y a plus aucun lien électrique entre le GBF et le reste du circuit.



TECHNOLOGIE

L'ESSENTIEL

> Recharger les batteries d'un appareil électronique sans l'intermédiaire d'un fil est pratique, voire nécessaire pour certaines applications.

> Dans les techniques actuelles de recharge sans fil, le chargeur et l'appareil à charger doivent être immobiles l'un par rapport à l'autre et dans une position relative précise.

> Des chercheurs de l'université Stanford ont conçu un système insensible à l'écartement entre le chargeur et l'appareil. Cela ouvrirait la voie à un dispositif permettant de recharger pendant que l'appareil est en mouvement.

L'AUTEUR

GEOFFROY LEROSEY
chargé de recherche à l'institut Langevin (CNRS/ESPCI Paris), à Paris

Article publié initialement par *Nature* le 15 juin 2017 sous le titre *Wireless power on the move* (www.nature.com/articles/546354a). Traduction et édition réalisées par *Pour la Science*.

Recharger sans fil et en mouvement

RECHARGER LES BATTERIES D'UN TÉLÉPHONE OU D'UN VÉHICULE ÉLECTRIQUE SANS QU'IL Y AIT CONTACT MATÉRIEL EST POSSIBLE. MAIS POURRAIT-ON LE FAIRE TOUT EN ÉTANT EN MOUVEMENT ? OUI, GRÂCE À LA SYMÉTRIE PARITÉ-TEMPS...

La notion de transmission d'énergie sans fil remonte aux travaux pionniers de l'ingénieur d'origine serbe Nikola Tesla il y a un siècle environ. Mais l'idée n'a refait surface qu'au cours des dernières décennies, motivée par le nombre croissant d'appareils électroniques alimentés par des batteries – des brosses à dents aux tablettes numériques en passant par les implants médicaux.

Figurant parmi les dernières propositions, le « transfert d'énergie sans fil par résonance » permet de transmettre sans fil, avec efficacité, de l'énergie électrique à un appareil immobile. Cependant, avec le développement rapide des véhicules électriques, il serait intéressant de fournir de l'électricité à des dispositifs en mouvement. Sid Assawaworrarit, Xiaofang Yu et Shanhui Fan, chercheurs au département de génie électrique de l'université Stanford, aux États-Unis, viennent de rapporter dans la revue *Nature* du 15 juin dernier une stratégie astucieuse pour résoudre ce problème, en faisant appel à un concept de la physique fondamentale nommé symétrie parité-temps.

INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE ENTRE DEUX BOBINES

Les chargeurs sans fil modernes fonctionnent typiquement de la façon suivante (*voir l'encadré page 70*). On se sert d'ondes radio pour exciter une bobine de fil conducteur, que l'on qualifie d'inductance résonante et qui joue le rôle de réservoir d'énergie électromagnétique. Lorsqu'une seconde inductance résonante suffisamment similaire est approchée du premier, les inductances interagissent fortement ; elles échangent de l'énergie plus vite qu'elles ne peuvent en acquérir ou en dissiper, et se comportent comme un circuit unique dans lequel l'énergie est uniformément répartie. Un circuit électrique nommé redresseur extrait alors l'énergie électromagnétique >

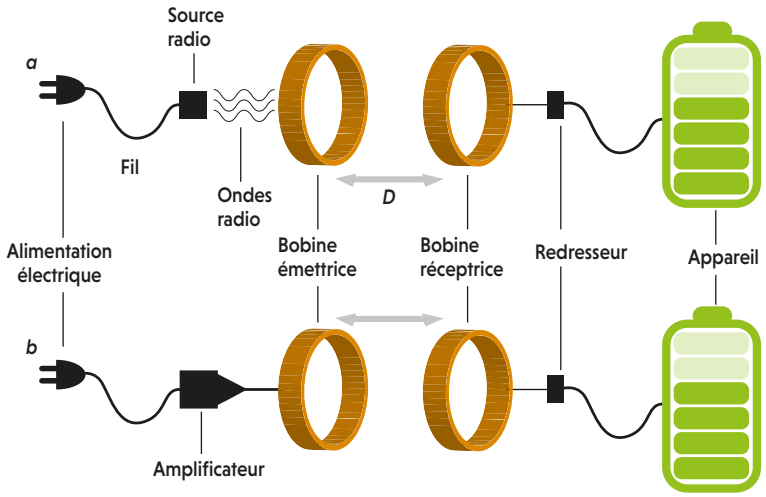
TECHNOLOGIE
RECHARGER SANS FIL ET EN MOUVEMENT

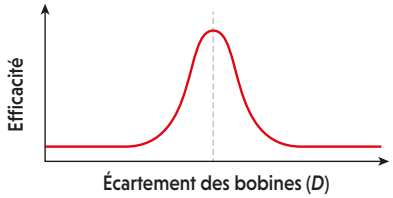
DEUX MÉTHODES POUR TRANSFÉRER SANS CONTACT DE L'ÉNERGIE

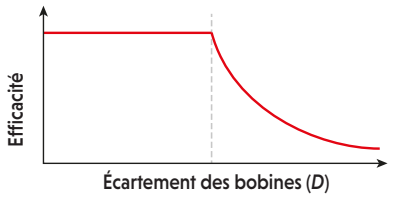
Dans des chargeurs modernes sans fil, on fournit de l'énergie électrique à une source d'ondes radio *(a)*, lesquelles excitent une bobine de fil conducteur nommée inductance résonante (la bobine émettrice). Quand on approche une seconde inductance (la bobine réceptrice) de la première, la paire se comporte comme un seul circuit où l'énergie électromagnétique se répartit uniformément. Un circuit électrique nommé redresseur extrait alors l'énergie de la bobine réceptrice et la transmet à l'appareil à charger.

Dans cette approche, l'efficacité du transfert d'énergie entre les bobines n'est maximale que si leur écartement prend une valeur donnée *(ligne pointillée dans le graphique du schéma a)*.

Sid Assawaworrarit, Xiaofang Yu et Shanhui Fan, de l'université Stanford, ont fait la démonstration d'une méthode alternative où la source d'ondes radio est remplacée par un amplificateur, qui amplifie l'énergie électromagnétique dans la bobine émettrice *(b)*. En exploitant une notion de physique fondamentale nommée symétrie parité-temps, ces chercheurs atteignent une efficacité maximale du transfert d'énergie entre les bobines quel que soit leur écartement, jusqu'à une distance de 70 centimètres environ *(ligne pointillée dans le graphique du schéma b)*.







> présente dans la seconde inductance et la transfère à l'appareil qu'il faut charger.

L'un des avantages de cette approche par rapport à d'autres techniques est qu'elle utilise des inductances et donc des champs pour l'essentiel magnétiques plutôt qu'électriques. Comme les champs magnétiques interagissent plus faiblement avec la matière vivante que les champs électriques, la méthode est plus sûre pour les applications pratiques. De plus, l'énergie peut être transmise sans fil sur des distances pouvant aller jusqu'à 1 mètre, selon la taille des bobines.

SENSIBILITÉ À L'ÉCARTEMENT DES BOBINES ET À LEUR ORIENTATION

Toutefois, cette approche présente un inconvénient majeur. Le fort couplage entre les inductances résonantes influe sur leurs propriétés électromagnétiques d'une façon qui dépend beaucoup de l'écart entre les inductances et de leur orientation relative. Par conséquent, les propriétés de la source radio doivent être finement ajustées à l'aide d'un circuit électronique afin d'obtenir un transfert d'énergie efficace, ce qui est difficile à réaliser si les bobines ne sont pas immobiles.

Sid Assawaworrarit et ses collègues ont adopté une stratégie complètement différente, fondée sur la notion de symétrie parité-temps – propriété caractérisant les systèmes physiques qui ne changent pas sous l'effet combiné d'une réflexion dans un miroir et de l'inversion du sens d'écoulement du temps. La symétrie parité-temps puise ses racines dans la mécanique quantique, et la question de savoir si cette symétrie est une propriété fondamentale de la nature reste ouverte. Néanmoins, il est possible de construire des systèmes classiques (non quantiques) présentant une symétrie parité-temps, ce qui permet d'explorer à la fois le concept et ses applications potentielles.

De tels systèmes sont constitués de composants disposés symétriquement qui peuvent soit absorber l'énergie électromagnétique (canaux de dissipation) soit l'émettre et l'amplifier (canaux de gain). Ils jouissent de propriétés particulières qui ont conduit à de

© Pour la Science

Les ingénieurs envisagent d'équiper les autoroutes du futur de dispositifs capables de charger les véhicules électriques pendant qu'ils roulent. Au moyen de quelle technique ? La question reste ouverte.

© Cheski/Shutterstock.com