

La bobine

La bobine, bien qu'étant relativement facile à fabriquer, possède des propriétés étonnantes. Condensateurs et bobines se ressemblent, moyennant quelques analogies.

En électricité, le terme "bobine" peut en réalité désigner deux dispositifs :

- un dipôle électrique
- un dispositif destiné à produire des tensions élevées

Les propriétés physiques de la bobine découlent de la physique du "magnétisme" (ou "électromagnétisme"). Ces phénomènes électromagnétiques sont abordés succinctement à la fin du document.

Généralités

Qu'est-ce qu'une bobine ?

Une bobine est un dipôle passif non polarisé constitué d'une à une multitude de **spires** de fil conducteur autour d'un **noyau**.

Le nombre de spires, le matériau (air, bakélite, fer...) et la forme (rectiligne, en U, fermée) du noyau influenceront sur les propriétés de la bobine. Nous y reviendrons plus loin.

Présentation

Comme pour les autres composants, on en trouve de différentes tailles, de différentes formes.

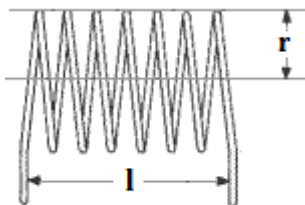
Voici quelques exemples :



De gauche à droite :

- une bobine rectiligne
- une bobine circulaire
- et une bobine moulée.

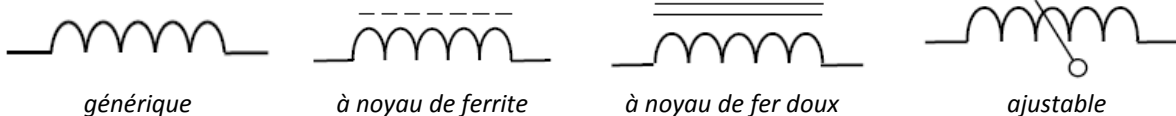
Suivant la forme de la bobine, différents noms peuvent lui être donnés.



- Si la longueur l est petite devant son rayon r , la bobine est dite **plate**.

- Si l est voisin de r , la bobine est appelée **solénoïde**.

Symbole



Utilisation

Les bobines sont très utiles, dans de nombreux domaines.

Les bobines, associées avec une résistance et/ou un condensateur, sont notamment très utilisées en filtrage. Si vous démontez votre amplificateur audio ou vos enceintes, il y a fort à parier que vous trouverez des bobines.

En outre, la bobine présente des propriétés électromagnétiques. Associée à une autre bobine ou à des aimants, elle va pouvoir servir de transformateur de tension, de mécanisme de moteur, ou encore de micro de guitare électrique !

Les phénomènes électromagnétiques sont abordés succinctement à la fin du document.

La bobine

Influence d'une bobine dans un circuit

Effectuons un petit montage :

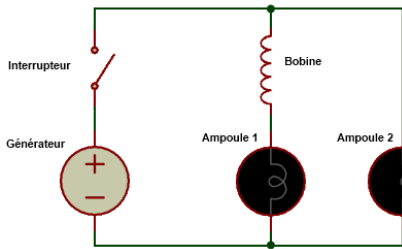


Figure 1 : montage initial

État initial t_{-1} , ou t_3 réouverture du circuit

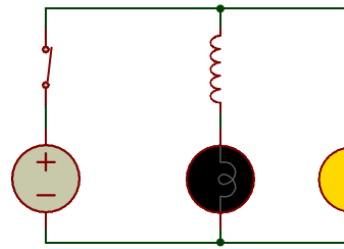


Figure 2 : montage au temps t_0

A l'instant t_0 , on ferme l'interrupteur. Immédiatement, la lampe 2 s'allume. Par contre, on remarque que la lampe 1 ne s'allume pas de suite.

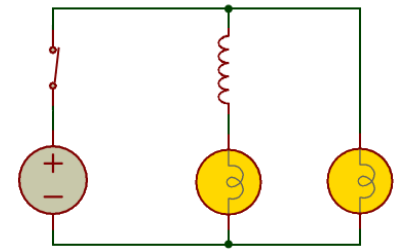


Figure 3 : montage au temps t_1

Quelques instants plus tard, à l'instant t_1 , la lampe 1 s'allume à son tour.

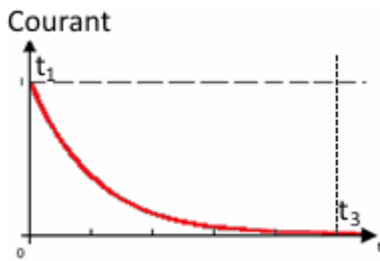


Figure 5 : t_3 décharge du courant dans une bobine à travers une résistance,

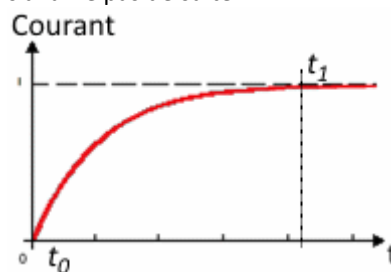


Figure 4 : charge du courant dans une bobine à travers une résistance

Processus pas à pas :

- avant t_0 , l'interrupteur est ouvert. Aucun courant ne circule dans le circuit.
- à t_0 , l'interrupteur est fermé. Un courant s'établit immédiatement dans la lampe 2 qui s'allume. On constate en revanche que la lampe 1 ne s'allume pas : aucun courant n'est encore établi (plus exactement, le courant y est nul).
- à t_1 , la lampe 2 s'allume enfin. Un courant la parcourt.

Bilan : la bobine s'est opposée temporairement à l'établissement du courant. Une fois le courant établi, la bobine se comporte comme un fil.

Elle s'oppose à l'établissement (ou à l'annulation) du courant, tout comme le condensateur s'oppose à l'établissement (ou à l'annulation) d'une tension.

L'intensité du courant électrique dans un circuit comportant une bobine ne subit pas de discontinuité : le courant s'établit de façon progressive et s'annule de la même façon ; l'intensité du courant électrique ne peut pas passer de façon instantanée de la valeur zéro à une valeur I.

Propriétés d'une bobine

L'inductance

Comme le condensateur, la bobine a la capacité d'emmagasiner de l'énergie. Cette caractéristique est appelée **inductance**, est représentée par la lettre **L** et s'exprime en Henry (H).

Valeur	Symbole	Puissance de 10	Utilisation
Henry	H	10^0	Rare
milli Henry	mH	10^{-3}	courante
micro Henry	μ H	10^{-6}	Très courante
Nano-henry	nH	10^{-9}	Très courante

La bobine

On utilise néanmoins plus souvent le milli-Henry, en effet car la taille d'une bobine est proportionnelle à sa grandeur en Henry. En règle générale, une bobine de plusieurs Henry sera très grosse. Mais surtout, les bobines de forte valeur sont plutôt utilisées en électronique de puissance. Nous, nous n'aurons affaire qu'avec des bobines de petites tailles et de petites valeurs, propre à l'électronique de traitement des signaux.

Joseph Henry 1797 -1878 (qui donne à l'inductance son unité) est un physicien américain du 19ème siècle, qui travailla essentiellement sur l'électromagnétisme. Il perfectionna les électroaimants, inventa un télégraphe électromagnétique et conçut l'un des premiers moteurs magnétiques. https://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_Henry

Constante de temps pour la bobine τ : $T = L * R$

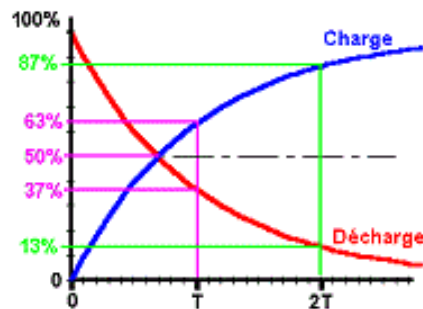


Figure 6 : taux de charge et de décharge d'une bobine

Calcul d'inductance

L'inductance d'une bobine ne dépend que des caractéristiques géométriques de celle-ci.

Il n'existe aucune formule fiable pour le calcul de l'inductance des bobines : chacune est le fruit d'approximations et a donc ses limites de précision.

Une formule courante, pour une bobine de longueur l, qui possède N spires de surface de section S :

$$L = \mu * \frac{N^2}{l} * S$$

- L : inductance de la bobine en Henry (H)
- N : nombre de spires de la bobine
- l : longueur de la bobine (et non pas la longueur du fil qui la compose) en mètres (m)
- S : section de la bobine (de son fil, ici) en mètres carrés (m²)

Paramètre μ ?

C'est la **perméabilité** du milieu autour duquel sont enroulées les spires. Pour le vide (ou pour l'air "sec"), ce paramètre s'appelle μ_0 et est égal à $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$ (en henry par mètre). Pour les matériaux magnétiques comme le fer, le nickel ou le cobalt, μ varie de 20 à 3000 selon le matériau et sa forme. On comprend donc aisément l'avantage que l'on a à enrouler nos spires autour de noyaux composés de ces matériaux.

Énergie emmagasinée

Une bobine est capable d'emmagasiner de l'énergie au même titre que le condensateur. Il s'agit pour la bobine d'énergie magnétique.

Pour une bobine d'inductance L, traversée par un courant I, l'énergie emmagasinée, exprimée en joule (J), est donnée par la formule :

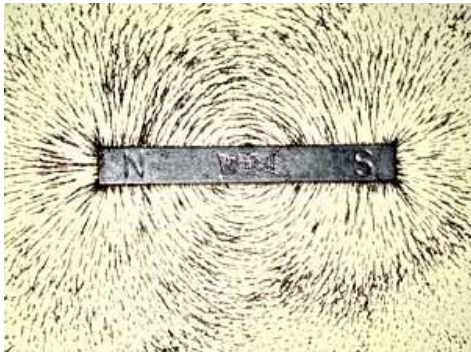
$$E = \frac{1}{2} * L * I^2$$

- E : l'énergie en Joule (J)
- L : l'inductance de la bobine en Henry toujours (H)
- I : l'intensité du courant parcourant la bobine, en Ampères (A)

La bobine

Le flux

Je ne vous ai pas démontré d'où viennent ces formules ni comment le Henry est défini, car, encore une fois, il s'agit de physique un peu trop avancée pour notre propos. Néanmoins, il me semble intéressant de vous parler de **flux**.



De la limaille (de la poudre de fer) est répandue autour d'un aimant (ici rectiligne, avec le pôle Nord à gauche et le pôle Sud à droite). La limaille va s'organiser et dessiner ces espèces de chemins partant d'un pôle pour arriver à l'autre ou partant vers l'infini. Ces chemins s'appellent des **lignes de champ** (magnétiques) et sont plus ou moins intenses : la limaille sera plus ou moins attirée sur ces chemins.

Cette intensité de ligne de champ est appelée le **flux ϕ** ("phi", lettre grecque) et son unité est le **Weber**.

Figure 7 : champ magnétique d'une bobine

Une bobine traversée par un courant est un aimant qui produit un flux.

Le Henry est l'inductance de la bobine constituée d'une seule spire, parcourue par un courant de 1 ampère et générant un flux de 1 Weber qui, lui-même peut libérer une énergie égale à 1 joule.

$$\phi = L * I$$

La bobine réelle

La technologie de fabrication d'une bobine (fil, spires, noyau, etc.) engendre des éléments parasites :

- en série : une résistance, principalement due à celle du fil constituant la bobine
- en parallèle : une capacité, notamment due à un phénomène électrostatique entre spires, et qui modifie son comportement en haute et très haute fréquences.

Il « existe » une résistance série et un condensateur en parallèle, induisant des **effets** résistif et capacitif.

En réalité, il n'y en a pas, ce sont des éléments parasites, dus à la constitution même de la bobine.

un modèle de bobine proche de la réalité est représenté dans la figure à droite :

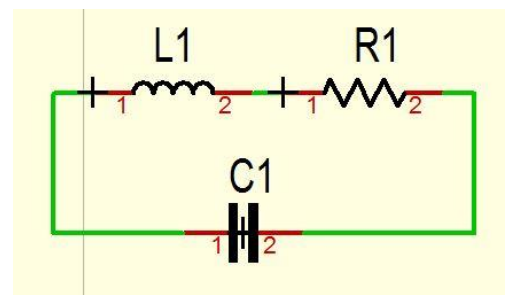


Figure 8 : modèle équivalent d'une bobine réelle

Les associations de bobines

Elles répondent en tous points aux associations des résistances.

La bobine en régime continu est un fil (résistant) !

Le soft-start

Le *soft-start* est, littéralement, le démarrage en douceur.

Certains montages sont sensibles aux brusques variations de courant. Pour éviter, lors de la mise en route, une élévation immédiate du courant, il suffit de placer une bobine dans la maille principale d'arrivée du courant. C'est le montage que je vous ai montré lorsque j'ai introduit la bobine.

La bobine

Ce système existe aussi avec des condensateurs, pour des circuits sensibles aux fortes variations de tension.

Les relais

Un relais est un système de commutation (en clair, un interrupteur 🤖) commandé par une bobine.

Je vous présente un relais et vous explique ensuite comment l'utiliser.



Figure 9 : photo d'un relais - image issue de Wikipédia

Vous voyez par transparence une bobine à droite, et des connecteurs divers à gauche.

Et en voici une schématisation :

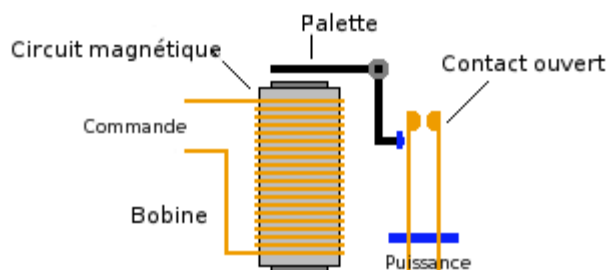


Figure 10 : schématisation d'un relais - image issue de Wikipédia

Principe de fonctionnement

Je vous l'avais dit, une bobine traversée par un courant est un aimant. Le relais se sert de cette propriété :

- lorsque aucun courant n'est appliqué à la bobine, la palette (voir ci-dessus) est libre, les connecteurs ne sont pas en contact et aucun courant, ni aucune puissance, n'y circulent : c'est un **interrupteur ouvert**.
- lorsqu'un courant est appliqué à la bobine, la palette est attirée vers la bobine, et pousse, par un jeu de levier le connecteur de gauche sur celui de droite. Il y a contact : c'est un **interrupteur fermé**.

Intérêts

La bobine

Les relais peuvent être utilisés pour différentes applications.

Il est par exemple possible de commander avec un circuit de faible puissance (circuit de la bobine) un circuit de forte puissance (celui des connecteurs). Il est toujours préférable de limiter la puissance où cela est possible, dans un souci d'économie d'énergie et de sécurité. Par exemple, vous pouvez commander avec un montage électronique fonctionnant sur du 9V, une ampoule connectée au 230V du réseau électrique, ceci grâce au relai. Ce dernier offrant **une isolation galvanique** entre le montage et l'ampoule.

Par ailleurs, un relai peut être commandé numériquement (avec des 0 ou des 1 logiques) pour laisser passer (ou non) un signal analogique (comme un signal audio).

La bobine en régime variable

L'impédance d'une bobine

Tout comme le condensateur, il est possible de définir l'impédance d'une bobine (idéale) :

$$Z_L = 2\pi f \cdot L$$

Avec :

- Z_L : l'impédance de la bobine en Ohm (Ω) ;
- f : la fréquence appliquée à la bobine en Hertz (Hz) ;
- L : l'inductance de la bobine.

Je le rappelle, l'impédance est une propriété fictive. Si vous mesurez à l'ohmmètre une bobine, vous obtiendrez une valeur qui correspond uniquement à la résistance de l'enroulement de fil, et non la valeur de l'impédance, qui dépend de la fréquence appliquée.

Il est également possible d'utiliser $\omega = 2\pi f$ et donc de mettre la formule précédente sous la forme suivante : $Z_L = L\omega$

Il s'agit bien ici de l'impédance d'une bobine **idéale**. Si vous utilisez un modèle avec une résistance (R_S) en série, l'impédance devient : $Z_{Lmod} = R_S + L2\omega2-----V$.

Loi d'Ohm

Toujours comme pour le condensateur, l'impédance de la bobine peut servir pour calculer des valeurs de tension ou de courant par la loi d'Ohm généralisée :

$$U = Z \cdot I$$

Avec :

- U : tension en V
- Z : impédance en Ω
- I : intensité du courant en A

Retard de phase

Réalisons un montage simple, et plaçons-y des appareils de mesures :

La bobine

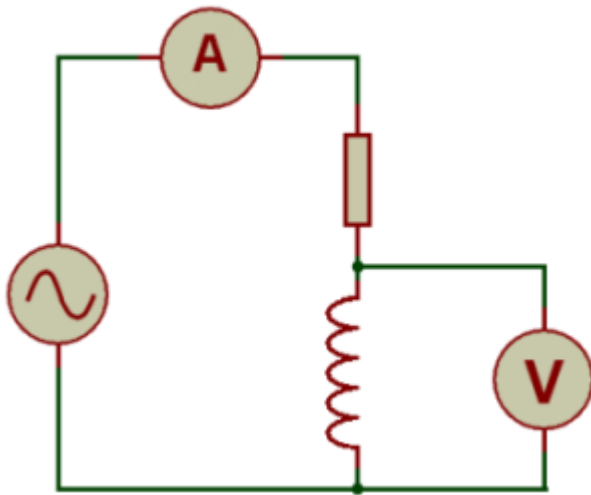


Figure 11 : mesure du déphasage

Voilà ce que l'on observe, tension et courant en fonction du temps :

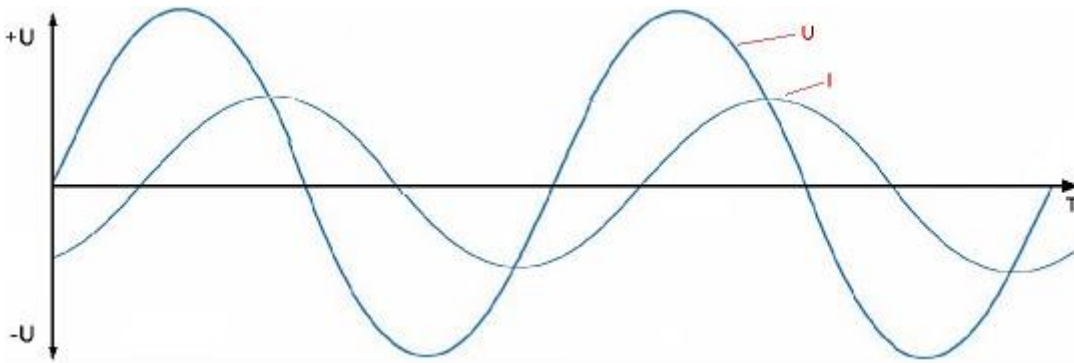


Figure 12 : retard du courant par rapport à la tension

Dans une bobine, le courant est déphasé (en retard) de 90° par rapport à la tension : il est "ralenti". C'est exactement l'inverse du condensateur où c'est la tension qui est en retard par rapport au courant.

Comportement fréquentiel

A présent, intéressons-nous, pour une bobine idéale, aux variations de la tension U pour une valeur de courant I donnée, en fonction de la fréquence.

Fréquence nulle

Si $f=0$ alors $U=Z \cdot I=2\pi f \cdot L \cdot I=0$

A fréquence nulle, c'est-à-dire en régime continu, la bobine se comporte comme un fil (😁 C'est bien ce que je disais plus haut !)

Fréquence infinie

Plus le générateur va monter en fréquence, plus la tension va augmenter (dans les limites du générateur).

La bobine

On va dire que la bobine a un comportement **passé-haut** : elle laisse passer les hautes fréquences sans problèmes ; en revanche, elle atténue les basses. Nous reviendrons plus en détail sur ces notions dans le chapitre sur le filtrage.

Conclusion

Pour une bobine réelle, son comportement est différent selon la fréquence du signal qui lui est appliqué. Pour une fréquence nulle, la bobine se comporte comme une impédance ; pour une fréquence infinie, la bobine est équivalente à un interrupteur ouvert.

Courant continu



Phénomène de résistance - le courant "passe"

Haute fréquence



Interrupteur ouvert- le courant ne passe pas

Pour aller plus loin

Je vais ici parler un peu plus du phénomène d'induction qui régit le fonctionnement des bobines. Cette partie est essentiellement culturelle.

Le phénomène d'induction

Branchons une bobine sur un galvanomètre et déplaçons un aimant droit dans son environnement :

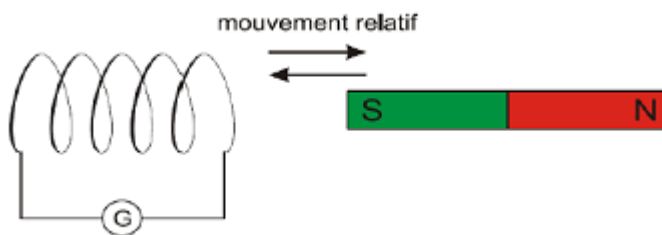


Figure 13 : expérience avec une bobine et un aimant droit

D'abord, déplaçons l'aimant tel qu'il est orienté de la droite vers la gauche. L'aiguille du galvanomètre dévie.

Je vais supposer que l'aiguille dévie vers la droite. En réalité, cela dépendra du galvanomètre.

Lorsque le déplacement cesse, l'aiguille revient à sa position de repos.

A présent, déplaçons notre aimant, toujours orienté de la même manière, de gauche à droite. L'aiguille du galvanomètre dévie dans l'autre sens, vers la gauche !

Maintenant, renversons l'orientation de l'aimant et recommençons cet aller-retour. L'aiguille dévie d'abord vers la gauche, puis vers la droite !

Enfin, accélérons nos mouvements : les déviations sont plus importantes.

Interprétation

La bobine

Lorsqu'il y a déplacement d'une source du champ magnétique (ici l'aimant) près d'un circuit électrique fixe (ici la bobine), une tension apparaît aux bornes du circuit : il se comporte comme un générateur. A l'intérieur du circuit, une **force électromotrice (fém..)** engendre cette tension.

Un peu de vocabulaire

- La source de champ variable (ici l'aimant droit) est appelée l'**inducteur** ;
- Le circuit dans laquelle apparaît la fém. (ici la bobine) est appelé l'**induit** ;
- la fém. est appelé force électromotrice **induite** et le phénomène **induction électromagnétique** ;
- le courant associé à la fém. est appelé **courant induit** (comme c'est original 🤖).

La loi de Lenz

La loi de Lenz s'exprime simplement :

Le phénomène d'induction électromagnétique est tel que par ses effets, il s'oppose à la cause qui lui a donné naissance.

Euh... oui, mais encore ? Concrètement, ça signifie quoi ?

Eh bien la loi de Lenz nous permet - entre autres - de déterminer rapidement l'orientation de la fém. induite créée dans un circuit.

Je rappelle d'abord qu'une bobine parcourue par un courant se comporte comme un aimant. Les lois de l'électromagnétisme (établies par Maxwell au passage 🤖) permettent de relier le sens du courant aux lignes de champ magnétique et donc de déterminer les pôles de l'aimant ainsi créé.

Je ne vais pas vous le démontrer, ce serait trop compliqué, mais voici une illustration des lois de Maxwell :

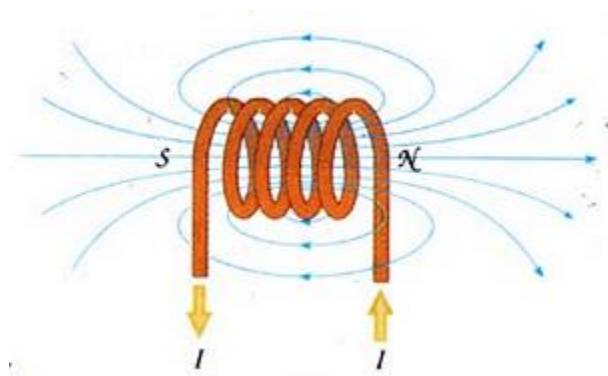


Figure 14 : champ magnétique d'une bobine

Reprenons à présent notre circuit, et supposons-le fermé. La loi de Lenz nous dit que le courant induit, de par sa circulation dans le circuit s'opposerait à la cause qui lui donne naissance.

Ainsi, si l'on approche le pôle Nord de l'aimant de la bobine par la droite, le courant induit fait apparaître un pôle Nord dans la bobine à droite, pour repousser l'aimant (les pôles de même nature se repoussent). On peut alors en déduire, grâce au schéma précédent, le sens du courant induit et par suite celui de la fém. induite, dans le même sens que le courant puisque la bobine se comporte comme un générateur.

L'auto-induction

Dans ce cas précis, l'inducteur est aussi l'induit.

La bobine

Imaginons une bobine (parcourue par un courant I) dans un circuit.

- Si I varie, une fém. apparaît aux bornes de la bobine pour contrecarrer cette variation ;
- Si le flux magnétique créé par la bobine est perturbé (par un aimant par exemple), un courant induit s'ajoute à I pour contrecarrer cette perturbation.

Exemples d'applications du phénomène d'induction

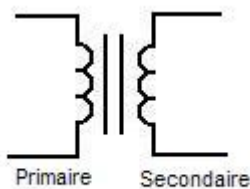
Les transformateurs

Citation : Wikipédia

Un transformateur électrique est un convertisseur permettant de modifier les valeurs de tension et d'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative, en un système de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme.

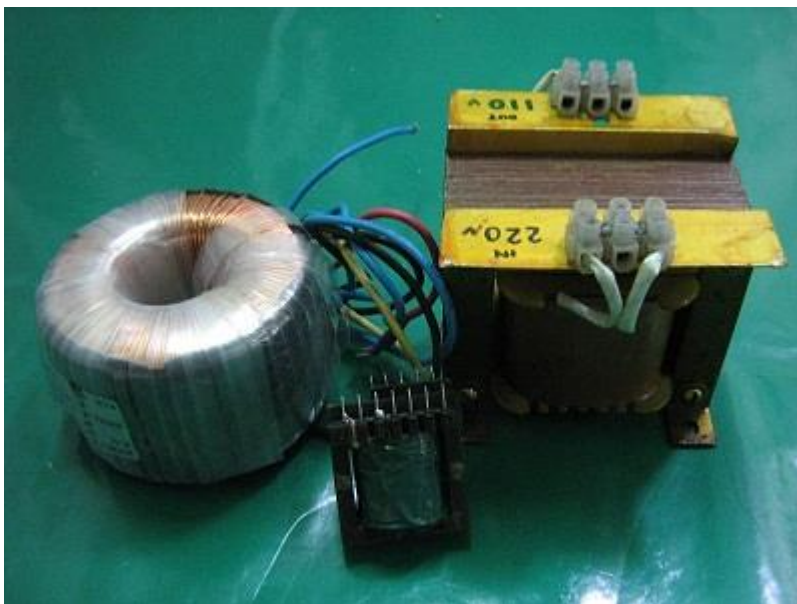
Un *transformateur* est constitué d'un assemblage de 2 bobines dites **primaire** (souvent le secteur, soit 220-230V ou 110V selon les pays) et **secondaire**.

Le symbole d'un transformateur représente bien ces deux bobines mises face à face :



Les deux barres verticales au centre représentent le noyau du transformateur, dont le rôle est similaire à celui des bobines.

Et voici à quoi cela peut ressembler :



La bobine

Figure 15 : photo de transformateurs -

De gauche à droite, un transformateur : torique, pour circuit imprimé et à noyau de ferrite

Le principe est simple :

- le primaire est alimenté avec une tension alternative et est parcouru par conséquent par un courant alternatif. Il se comporte donc comme un aimant dont le champ magnétique varie, c'est-à-dire comme un aimant que l'on déplace, à **proximité du secondaire** ;
- le secondaire répond à cet aimant se déplaçant à proximité de lui par la loi de Lenz : il y a au secondaire une fém. et un courant induits.

Comment alors transformer la tension ?

Tout est question de nombres de spires :

- plus le nombre de spires au primaire est important, plus le champ magnétique généré est intense ;
- plus le nombre de spires au secondaire est important, plus l'influence du champ magnétique à proximité est importante.

Ainsi, en jouant sur le rapport entre le nombre de spires au primaire et le nombre de spires au secondaire, il est possible de modifier (principalement abaisser, mais l'on peut aussi augmenter) la tension.

Pour un rapport donné, en doublant le nombre de spires, le champ magnétique est doublé, et par conséquent, le courant induit est doublé. Ainsi, il est également possible d'ajuster la valeur du courant.

Les micros de guitare électrique

Les micros de guitare sont des systèmes très ingénieux. Voici comment ils sont construits :

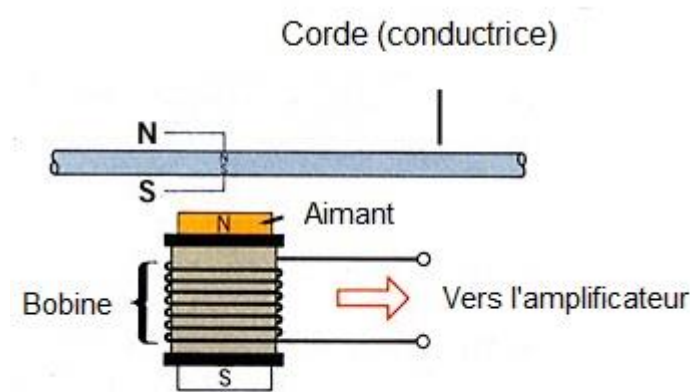


Figure 16 : micro de guitare électrique

Un aimant est entouré d'une bobine et est placé sous la corde, conductrice. Cette propriété de la corde est importante : un élément conducteur déforme les lignes de champ d'un aimant. C'est d'ailleurs grâce à cette propriété que les conducteurs sont attirés par les aimants.

Revenons à nos micros. Le fonctionnement est le suivant :

- le guitariste pince la corde conductrice ;
- la corde en mouvement perturbe le champ magnétique de l'aimant, à la fréquence de la corde ;
- la bobine autour de l'aimant "ressent" cette perturbation et, suivant la loi de Lenz, y répond par la création d'une tension et d'un courant induits, de même fréquence que le mouvement de la corde ;

La bobine

- un amplificateur permet d'amplifier ce signal et de créer un son de même fréquence que celle de la corde, c'est-à-dire de créer la même note.

Vous venez de terminer la lecture du chapitre sur la bobine qui était le dernier chapitre parlant des composants passifs fondamentaux de l'électronique.

Je vous invite à passer au chapitre suivant qui vous permettra de valider vos connaissances en vous exerçant un peu. 😊