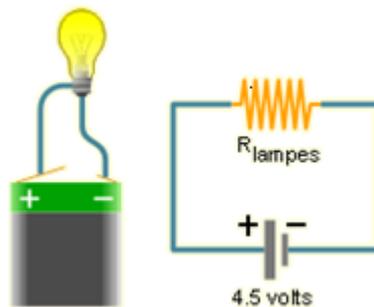


Module : Electricité industriel

Deuxième année LMD ST Spécialité génie Mécanique

Chapitre I : Les circuits Electriques

Un circuit électrique simple est une boucle fermée qui contient un générateur, un interrupteur et des récepteurs reliés par des fils de connexion. Le circuit le plus simple que l'on puisse représenter consiste en une source de tension U (pile, dynamo, ...) et un récepteur passif R (lampe, résistance chauffante, ...).



1. Courant et tension dans les circuits électriques

La tension électrique et l'intensité du courant électrique sont deux grandeurs qui caractérisent les circuits électriques.

Dans un circuit électrique, le courant électrique est dû à une circulation de "grains d'électricité" appelés électrons.

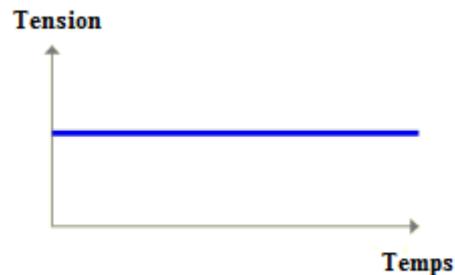
- **La tension** est la différence de niveau électrique entre les deux bornes d'un dipôle. C'est en quelque sorte la force qui permet aux "grains d'électricité" (électrons) de bouger. Elle se mesure en volt (V) et s'écrit U dans les formules.
- **Mesure d'une différence de potentiel** : Elle s'effectue avec un voltmètre. Il doit être monté en dérivation dans le circuit pour avoir à ses bornes la différence de potentiel à mesurer.
- **L'intensité** correspond au débit des "grains d'électricité" (électrons) circulant dans le circuit à un moment donné. Cette grandeur notée I . pendant un temps dt , il passe dq Coulombs, l'intensité vaut $I = dq/dt$.
- **Mesure de l'intensité d'un courant** : Elle s'effectue avec un ampèremètre. Il doit être monté en série dans le circuit pour être traversé par le courant à mesurer.

Dans un circuit électrique, le courant ne peut circuler que s'il existe une tension électrique non nulle. C'est le générateur qui permet d'appliquer une tension non nulle entre deux points d'un

circuit électrique et ainsi faire circuler le courant de sa borne positive (+) vers sa borne négative (-) s'il s'agit d'un générateur de courant continu.

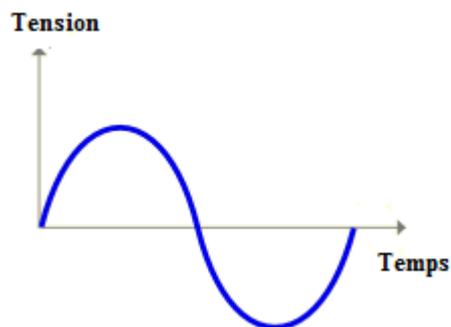
Courant continu

Si la tension U fournie par la source est constante, un courant constant I s'écoule : c'est un circuit à Courant continu (les électrons se déplacent toujours dans le même sens). C'est le cas pour les circuits électriques alimentés par une pile



Courant alternatif

Si la tension U fournie par la source varie suivant une loi sinusoïdale, un courant sinusoïdal (lui aussi) s'établit : c'est un circuit à courant alternatif. Alternatif, parce que le courant va traverser le récepteur alternativement dans un sens et puis dans l'autre. C'est cas pour les circuits alimentés par un alternateur.

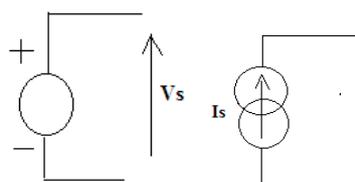


2. Sources de tension et de courant

2.1. Source parfaite

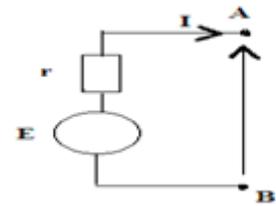
Une source de tension parfaite est définie comme un générateur de tension de résistance interne nulle.

De même une source de courant idéale présente une résistance interne infinie.

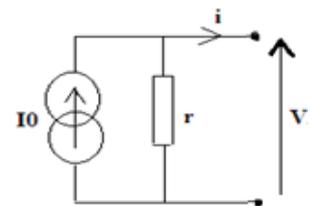


2.2. Source réelle

En réalité une source de tension, aussi bien qu'une source de courant ne sont jamais parfaites et présentent toujours une résistance interne. Une source **de tension** réelle est représentée par une source de tension parfaite de force électromotrice (f.e.m) E en série avec une résistance interne r : la tension fournie: $V_A - V_B = E - r I$

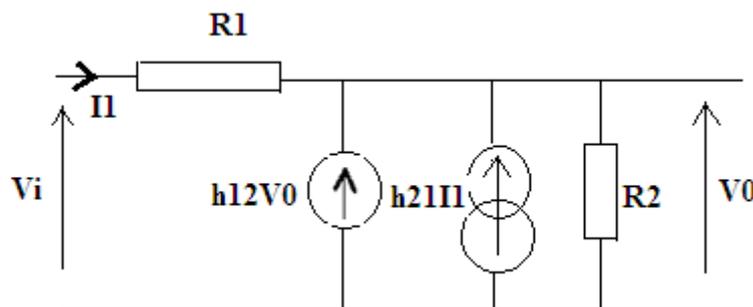


Une source **de courant** réelle est représentée par une source de courant parfaite de courant I_0 en parallèle avec une résistance interne r . La relation entre la tension V fournie et le courant débité est: $I = I_0 - V / r$.



2.3. Sources contrôlées

Elles sont définies comme étant des générateurs dont la tension ou le courant dépendent d'un paramètre existant dans un autre endroit du circuit électronique étudié. Exemple dans la figure suivante la source de tension contrôlé $h_{12}V_0$ dépend de la tension de sortie V_0 , alors que la source de courant $h_{21}I_1$ dépend du courant d'entrée I_1 .



3. Les éléments de circuit

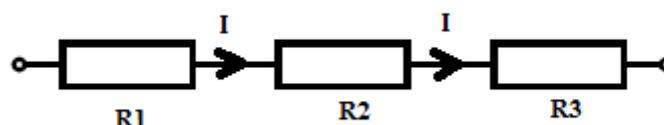
3.1. Resistance

La résistance électrique d'un conducteur est la propriété de ce conducteur de s'opposer plus ou moins au passage du courant. Elle s'exprime en Ω (ohm).

La tension aux bornes d'une résistance est reliée à l'intensité du courant par la loi d'ohm

Association de résistances en série

On dit que des résistances sont branchées en série lorsqu'elles sont connectées dans un ordre successif et traversées par le même courant.

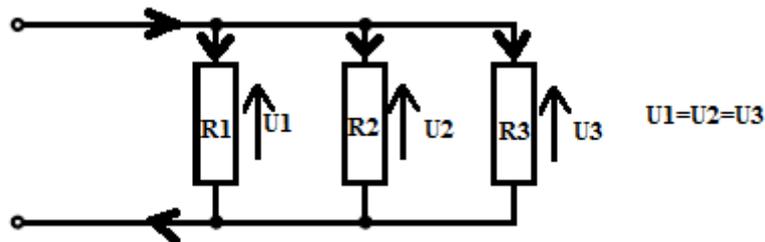


La résistance équivalente est donnée par la somme de toutes les résistances :

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

Association de résistances en parallèle (en dérivation).

On dit que des résistances sont branchées en parallèle lorsque toutes les bornes d'entrée du courant sont connectées entre elles et les bornes de sorties sont connectées ensemble. On trouve ainsi, aux bornes de chaque résistance la même différence de potentiel.



La résistance équivalente est donnée par la relation :

$$1 / R_{eq} = 1 / R_1 + 1 / R_2 + 1 / R_3$$

Exemple

Déterminer la résistance équivalente de ce dipôle

$$R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 12 \Omega, R_1 = 8 \Omega.$$

$$R_{eq} = R_5 // [R_1 + (R_2 // R_3 // R_4)]$$

$$1/R_{2,3,4} = 1/R_2 + 1/R_3 + 1/R_4 = 3/12$$

$$R_{2,3,4} = 12/3 = 4 \Omega$$

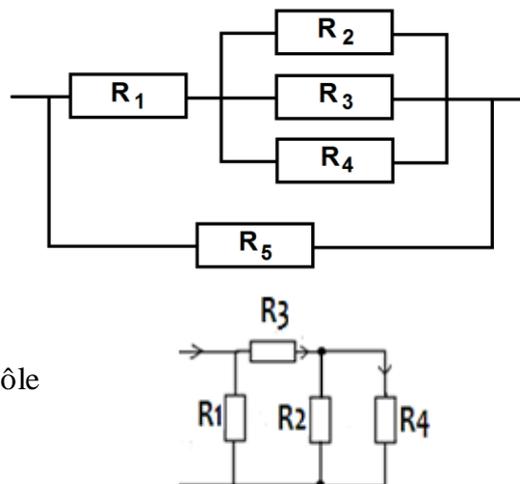
$$R_{1,234} = R_1 + R_{2,3,4} = 12 \Omega$$

$$1/R_{eq} = 1/R_5 + 1/R_{1,234} = 1/12 + 1/12 = 2/12$$

$$R_{eq} = 12/2 = 6 \Omega.$$

La même question pour le deuxième dipôle

$$R_{eq} = [(R_2 // R_4) + R_3] // R_1$$



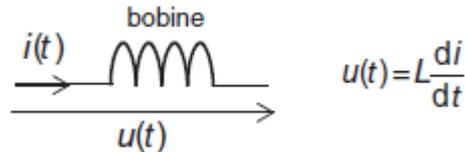
3.2. Inductance

Une bobine de fil conducteur constitue une inductance. La première fonction que nous pouvons relever est la création de lignes de flux magnétique ou la création d'énergie magnétique lorsqu'elle est parcourue par un courant.

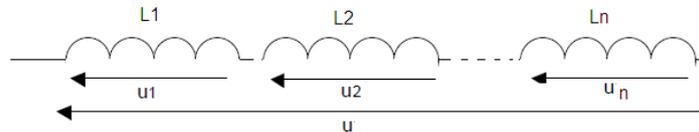
L'inductance est un dipôle défini par la relation entre les valeurs instantanées du flux magnétique $\phi(t)$ et du courant $i(t)$:

$$L = \frac{\phi(t)}{i(t)}$$

L'unité de l'inductance est le henry (H). C'est une unité très grande, on utilise généralement des unités plus petites, telles que le milli henry (mH), le micro henry (μ H) ou le nano henry (nH).



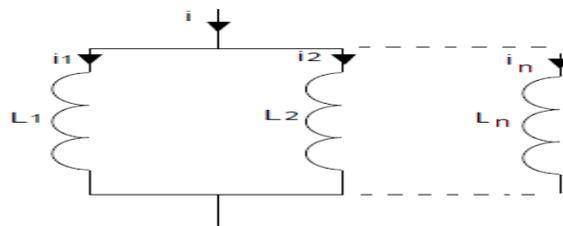
Mise en série d'inductances



L'association des bobines en série est équivalente à une bobine d'inductance:

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + \dots + L_n$$

Mise en parallèle des inductances



L'association des bobines placées en parallèle est équivalente à une bobine d'inductance :

$$1/L_{eq} = 1/L_1 + 1/L_2 + \dots + 1/L_n$$

3.3. Condensateur

Un condensateur est un composant conçu pour le stockage de la charge électrique, constitué de deux armatures séparées par un isolant (air, mica) caractérisé par sa capacité exprimée en Farad.

La capacité est définie par la relation entre la charge instantanée $q(t)$ en Coulomb et la tension instantanée $U(t)$ en volt.

$$C = \frac{q(t)}{U(t)}$$

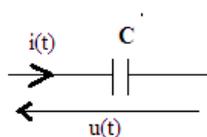
L'unité de la capacité est le farad (F). Le farad étant une unité très grande, on utilise généralement des unités plus petites, telles que le microfarad (μF), le nanofarad (nF) et le picofarad (pF).

$$1 \mu\text{F} = 10^{-6}\text{F} \quad 1 \text{nF} = 10^{-9}\text{F} \quad 1 \text{pF} = 10^{-12}\text{F}$$

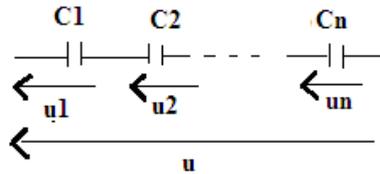
Un condensateur, en régime continu, n'est parcouru par aucun courant

$$U(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt$$

$$i(t) = C \frac{d}{dt} u(t)$$



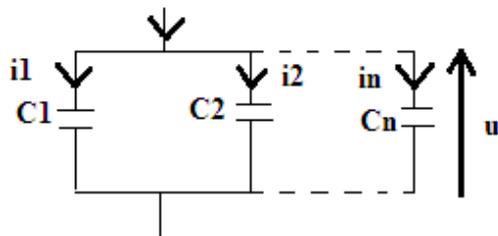
Mise en série des capacités : Un circuit composé de plusieurs capacités connectées en série peut se réduire à une unique capacité équivalente C_{eq} :



L'association des condensateurs en série est équivalente à un condensateur dont la capacité C_{eq} vérifié :

$$1/C_{eq} = 1/C_1 + 1/C_2 + \dots + 1/C_n$$

Mise en parallèle



L'association des condensateurs mis en parallèle est équivalente à un condensateur de capacité :

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

4. Loi d'Ohm

La loi découverte par le physicien allemand Ohm au début du 19^{ème} siècle, plus précisément en 1828, est la plus utilisée dans la résolution des problèmes en électricité et en électronique. Elle vise la relation existante entre les trois paramètres électriques d'un circuit ou composant : tension, courant et résistance.

$$U = R \times I$$

$$1 \text{ volt} = 1 \text{ ampère} \times 1 \text{ ohm}$$

Dans la pratique on utilise souvent aussi les deux autres expressions :

$$I = U / R$$

$$R = U/I$$

Exemple : une tension de 220 volts qui alimente une résistance de 10 ohms génère un courant de 22 ampères.

5. Lois de Kirchhoff

5.1. Définitions

Réseau électrique : toute association simple ou complexe de dipôles interconnectés, alimentée par un générateur.

Branche : partie dipolaire d'un réseau parcourue par un même courant.

Nœud: tout point du réseau commun à plus de deux branches.

Maille: une maille est un chemin fermé.

5.2. Loi des nœuds

- La somme des intensités des courants qui arrivent à un nœud est égale à la somme des intensités des courants qui en sortent.

Ou la somme algébrique des intensités des courants est nulle (en supposant positive les courants dirigés vers le nœud et négative ceux qui en sortent) .

Exemple

$$\sum I = 0$$

$$i_1 + i_4 + i_5 - i_2 - i_3 = 0$$

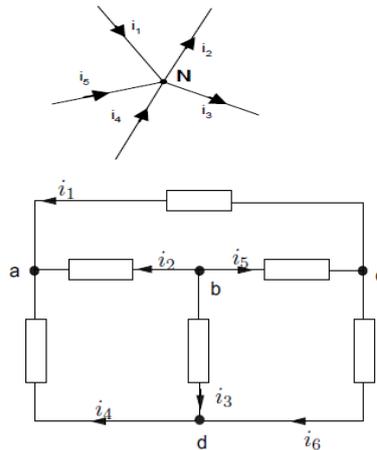
Exemple

$$\text{noeud a : } i_1 + i_2 + i_4 = 0$$

$$\text{noeud b : } -i_2 - i_3 - i_5 = 0$$

$$\text{noeud c : } -i_1 + i_5 - i_6 = 0$$

$$\text{noeud d : } -i_4 + i_3 + i_6 = 0$$



5.3. Loi des mailles

- La somme algébrique des tensions rencontrées dans une maille est nulle.

$$\sum U = 0$$

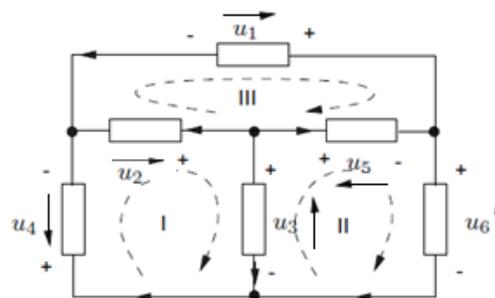
Les U orientées dans le même sens que le sens de parcours de la maille sont comptées positives, alors que ceux orientées dans le sens opposé au sens de parcours de la maille sont comptées négatives.

Exemple

$$\text{maille I : } -u_4 + u_2 - u_3 = 0$$

$$\text{maille II : } u_3 - u_5 - u_6 = 0$$

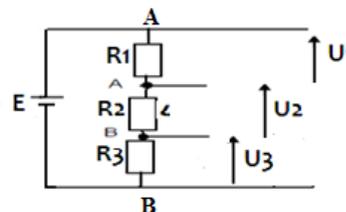
$$\text{maille III : } -u_2 + u_1 + u_5 = 0$$



- La tension totale entre deux points d'un circuit (une branche) est égale à la somme des tensions partielles.

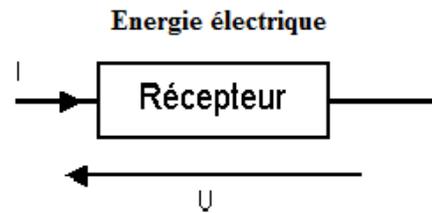
Exemple :

$$U_{AB} = U_1 + U_2 + U_3 = E$$



6. Energie électrique, effet Joule

Si le récepteur est soumis à une tension U et qu'il est traversé par un courant I pendant un temps t il va absorber de l'énergie électrique, Cette énergie est notée W .



$$W = U \cdot I \cdot t$$

En remplaçant $U \cdot I$ par P on peut écrire :

$$W = P \cdot t$$

avec :

W : énergie en joules (J)

P : puissance en watts (W)

t : temps écoulé en secondes (s)

En remplaçant U par RI on peut écrire :

$$W = R \cdot I^2 \cdot t$$

Cette énergie, dissipée dans la résistance et proportionnelle à la valeur de cette résistance, est présente partout où un courant circule. On parle alors de "pertes par effet Joule"

6.1. Mesure de l'énergie électrique

L'énergie électrique qui nous est fournie par le réseau électrique est mesurée par un compteur (watt-heuremètre ou énergiemètre) placé à l'entrée de l'installation. Cet appareil est gradué en **Kilowattheure**.

7. Puissance électrique en courant continu

La puissance électrique absorbée par une charge purement résistive est proportionnelle à la tension U aux bornes de la résistance et au courant I traversant celle-ci. Ce qui peut se résumer par la formule :

$$P = U \cdot I$$

avec : P en watt, U en volts et I en ampères.

D'après la loi d'Ohm on a :

$U = R \cdot I$ avec U en volts, R = résistance en ohm et I en ampères.

En remplaçant U par RI dans la précédente formule on obtient la formule suivante

$$P = R \cdot I^2$$

En remplaçant **I** par sa valeur déduite de la loi d'Ohm : **I = U/R** on obtient la formule :

$$P = U^2 / R$$

L'unité de puissance est le watt, symbole W

8. Courant monophasé et triphasé

Il existe deux types de courant électrique : le courant continu et le courant alternatif. C'est généralement ce dernier qui est distribué et acheminé jusqu'à notre domicile. Contrairement au courant continu, on ne parle pas, pour le courant alternatif, de pôle positif et négatif mais de phase et de neutre.

La phase est le fil conducteur qui amène le courant jusque chez nous. Le neutre est le fil qui en assure la répartition. Si l'on branche un voltmètre entre ces deux bornes, on observe une différence de tension d'environ 230 volts.

- **le courant monophasé** : il présente, comme son nom l'indique, une seule phase et un neutre. Ce sont donc deux fils conducteurs qui arrivent chez nous. Pour les reconnaître : fil noir ou rouge pour la phase, et fil bleu pour le neutre ;
- **le courant triphasé** : il présente quatre fils électriques : trois phases et un neutre. Les trois câbles de phase sont parcourus par une tension sinusoïdale, ou alternative, ce qui signifie que l'amplitude oscille et varie. Les trois phases qui composent le courant triphasé sont dites « déphasées ».

Le courant triphasé permet de limiter les déperditions lors du transport de l'électricité : c'est donc lui qui est généralement utilisé pour acheminer l'électricité jusque chez nous. Ensuite, nous pouvons faire le choix d'être raccordé au courant monophasé ou au courant triphasé, selon nos besoins en électricité :

- **le courant monophasé** convient parfaitement à tous les types d'appareils électriques ménagers, mais aussi pour le chauffage et l'éclairage, puisqu'il repose sur une différence de tension entre phase et neutre de 230 volts ;
- **le courant triphasé** convient aux appareils fonctionnant en 400 volts, soit essentiellement des appareils professionnels comme des pompes à chaleur, mais aussi certains fours ou des lave-linges particulièrement puissants.

Les professionnels et entreprises présentant des puissances de compteur importantes ou des appareils électriques nécessitant une tension élevée choisiront le triphasé

Chapitre II. Les circuits magnétiques

1. Electricité et magnétisme

Électricité et magnétisme sont deux aspects d'un même phénomène, l'électromagnétisme.

La relation entre l'électricité et le magnétisme a été clairement établie au XIX^{ème} siècle avec les travaux d'**Oersted**, **Ampère** et **Faraday**. Lorsque des charges électriques sont en mouvement, elles sont accompagnées non seulement de leur champ électrique mais aussi d'un champ magnétique.

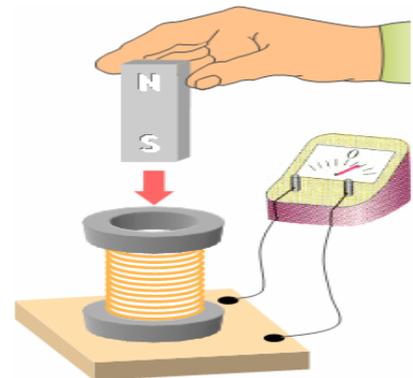
C'est **Oersted** qui, en 1820, a constaté pour la première fois, la déviation d'une boussole lorsqu'elle est placée au voisinage d'un fil parcouru par un courant électrique.

1.1. Un courant électrique crée un champ magnétique : Lorsqu'un fil conducteur est parcouru par un courant électrique, il crée autour de lui un champ magnétique analogue à celui qui accompagne un aimant permanent.

1.2. Un champ magnétique variable crée un courant électrique (c'est l'induction électromagnétique) : Si un courant électrique produit un champ magnétique, il en est de même pour un champ magnétique à condition que ce dernier soit **changeant (variable)**. Un aimant permanent ou un électro-aimant en mouvement, produit un courant électrique (**courant induit**) dans n'importe quel circuit fermé.

Expérience : Une bobine reliée à un ampèremètre et un aimant droit.

- Si un aimant reste immobile un ampèremètre, on n'observe aucun courant électrique
- Si on approche ou éloigne un aimant d'une bobine reliée à un ampèremètre, on observe un **courant induit** dans la bobine (l'aiguille de l'ampèremètre se déplace à droite ou à gauche).



Explication : en déplaçant l'aimant, on fait **varier** le champ magnétique de l'aimant à l'intérieur de la bobine, cette variation du champ magnétique au niveau de la bobine crée un courant induit dans la bobine. Ce phénomène est l'induction électromagnétique

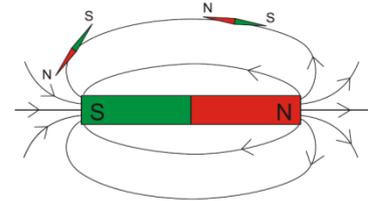
Application : les alternateurs et les transformateurs.

2. Champ magnétique :

On appelle champ magnétique de l'aimant l'espace situé autour de l'aimant et dans lequel il fait sentir son influence

2.1 Champ créé par un aimant droit

Les lignes de champ sortent du pôle N et entrent par le pôle S et leur ensemble constitue le spectre magnétique de l'aimant

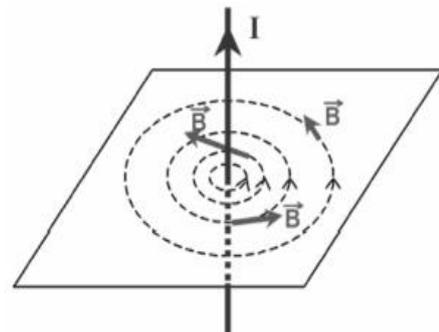


2.3. Champ créé par un conducteur rectiligne parcouru par le courant

Il n'y a pas de pôles N ni S. Le sens de \vec{B} dépend du sens de I. L'intensité B du champ augmente avec l'intensité de courant et diminue avec la distance au conducteur.

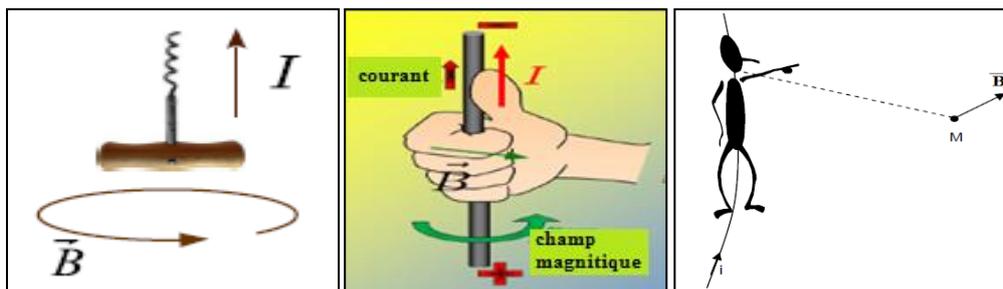
Les lignes de champ magnétiques s'enroulent autour du fil. Pour obtenir le sens on peut utiliser la règle du tire-bouchon, la règle de la main droite ou la règle du bonhomme d'Ampère.

Règle du bonhomme d'Ampère: Lorsqu'un bonhomme d'Ampère placé sur le fil, le courant entrant par ses pieds et sortant par sa tête, regarde le point M, son bras gauche indique le sens du champ \vec{B} .



Tire-Bouchon : le sens de rotation permettant une avancée du tire-bouchon dans le sens de I, indique le sens d'enroulement de \vec{B} .

Main droite : lorsque l'index pointe dans le sens de I les autres doigts se replient dans le sens de \vec{B} .



Dans le cas d'un conducteur droit, l'intensité du champ magnétique est :

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r}$$

Avec R la distance du point M au fil.

2.4. Champ magnétique généré par une bobine

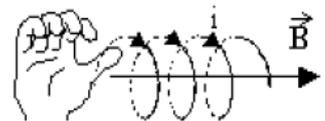
L'intensité du champ magnétique B [T] au centre d'une bobine de n spires (c.-à-d. n égale le nombre de tours du fil), de longueur ℓ [m], de rayon R [m], parcourue par un courant I [A] vaut :

$$B = \mu_0 \cdot \frac{n \cdot I}{\sqrt{4R^2 + \ell^2}}$$

μ_0 = perméabilité du vide : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ unités S.I. (H/m = henry/mètre)

Voici une méthode pour déterminer le sens du champ magnétique.

En fermant la main **droite** en suivant la rotation du courant, le champ magnétique s'oriente dans la direction du pouce

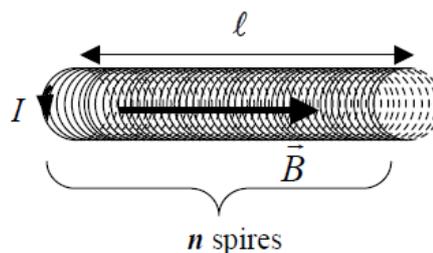


Voici deux cas particuliers :

a) La bobine longue : ($\ell \gg R$)

L'intensité du champ magnétique B au centre d'une bobine longue de n spires, de longueur ℓ , parcourue par un courant I vaut :

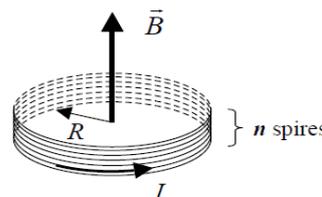
$$B = \mu_0 \cdot \frac{n \cdot I}{\ell}$$



b) La bobine plate : ($\ell \ll R$)

L'intensité du champ magnétique B au centre d'une bobine plate de n spires, de rayon R , parcourue par un courant I vaut :

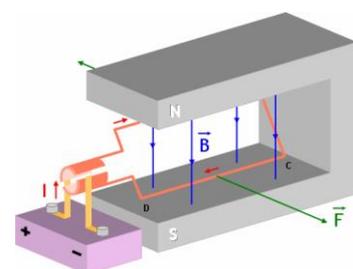
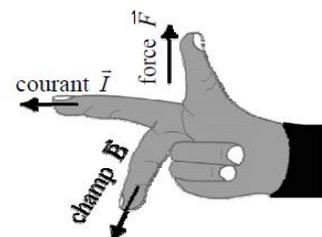
$$B = \mu_0 \cdot \frac{n \cdot I}{2 \cdot R}$$



3. Les forces magnétiques

3.1. Force de Laplace

La force électromagnétique ou force de Laplace est la force F qui s'exerce sur un conducteur de longueur ℓ parcouru par un courant d'intensité I lorsqu'il est entièrement plongé dans le champ magnétique uniforme B créé par l'aimant. La direction et le sens de la force F sont obtenus en appliquant la règle des trois doigts de la main droite.



- L'index représente sens du courant I
- le majeur est orienté dans le sens du champ magnétique B
- le pouce indique le sens de la force F

Exemple : principe de fonctionnement d'un moteur électrique à courant continu.

3.2. La force de Lorentz

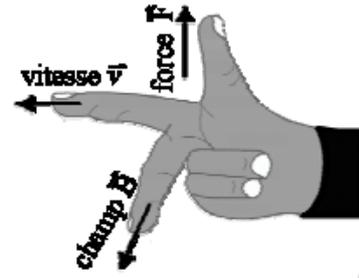
C'est une force qui s'applique à toute particule chargée en mouvement dans un champ magnétique ; l'expression de cette force est :

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}$$

Avec q charges de la particule

\vec{v} : Vitesse de la particule

\vec{B} : Champ magnétique



L'orientation de la force est perpendiculaire à la direction de la vitesse, et au champ magnétique. Le sens s'obtient grâce à la règle de la main droite.

4. Loi d'induction de Faraday

La force électromagnétique e induite dans une boucle de fil conducteur traversée par le flux magnétique Φ est donnée par :

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

Le signe (-) négatif détermine le sens du courant induit dans le circuit. La force électromotrice (e) induite produit toujours un courant dont le champ magnétique induit s'opposera au flux magnétique original (Loi de Lenz)

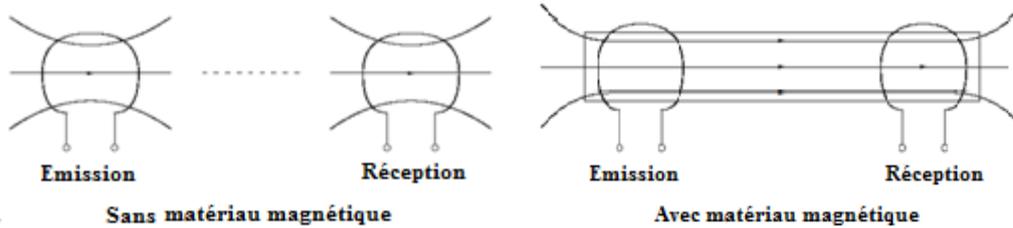
Si la boucle est remplacée par une bobine de N spires, la f.é.m. induite est :

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

Où Φ est le flux magnétique à travers une spire.

5. Matériau magnétique :

Un matériau magnétiques est un matériau de haute perméabilité magnétique ($\mu_r \gg 1$) Le rôle est de canaliser efficacement les lignes de champ magnétique. Ceci permet de réduire les fuites.



Pour un matériau magnétique, la relation $B(H)$ est :

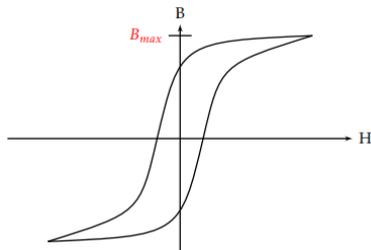
$$B = \mu_r \mu_0 H$$

Où μ_r est la perméabilité relative du matériau. Pour la plupart des matériaux, la perméabilité n'est pas constante, et la relation $B(H)$ est non-linéaire.

On peut classier les matériaux magnétiques en deux groupes importants :

- Matériaux *non-magnétiques* : μ_r est environ 1. Exemple : air, verre, cuivre, aluminium.
- Matériaux *ferromagnétiques* : μ_r est très élève (100 à 100000). Exemple : fer, acier, alliages, etc...

La caractéristique de magnétisation AC d'un matériau magnétique donne une courbe du type hystérésis, comme a la figure suivante :



Courbe hystérésis typique

6. Excitation magnétique :

Nous appellerons excitation magnétique, l'expression $H = \frac{n \cdot I}{l}$ dont la valeur commune aux deux circuits ne dépend pas de la nature des noyaux.

H : l'excitation magnétique est exprimée en Ampère par mètre [A/m] ;

I : le courant est exprimé en Ampère [A] ;

l : la longueur du solénoïde est exprimée en mètre [m].

6.2. Relation entre excitation magnétique et champ magnétique

Le champ magnétique à vide peut être exprimé comme suit : $B = \mu_0 \cdot H = \mu_0 \frac{n \cdot I}{l}$

Avec, Le vecteur induction magnétique \vec{B} et vecteur excitation magnétique \vec{H} sont colinéaires.

7. Circuit magnétique

Un circuit magnétique est semblable à un circuit électrique. C'est un parcours fermé qui est réalisé avec un matériau magnétique de haute perméabilité ($\mu_r \gg 1$). Cependant, on va faire quelques hypothèses pour l'analyse de ces circuits :

- On suppose que $B(H)$ est linéaire.
- Pas de saturation.
- Pas d'hystérésis.

Une force magnétomotrice $F = NI$ force un flux Φ à circuler dans le circuit magnétique. L'intensité du champ magnétique dans le noyau est donnée par la loi d'Ampère :

$$NI = \int H dl = Hl$$

La densité de flux dans le noyau est égale à :

$$B = \mu H$$

Le flux magnétique circulant dans une surface A est défini comme :

$$\varphi = \int_S B \cdot dA$$

Si le champ magnétique est homogène et la surface A uniforme, le flux magnétique est calculé avec le produit suivant :

$$\varphi = B \cdot A$$

Le flux magnétique circulant dans le noyau est égal à :

$$\varphi = BA = \mu HA = \mu \left(\frac{NI}{l} \right) A = \frac{NI}{\underbrace{\left(\frac{l}{\mu A} \right)}_{\mathfrak{R}}} = \frac{\mathfrak{F}}{\mathfrak{R}}$$

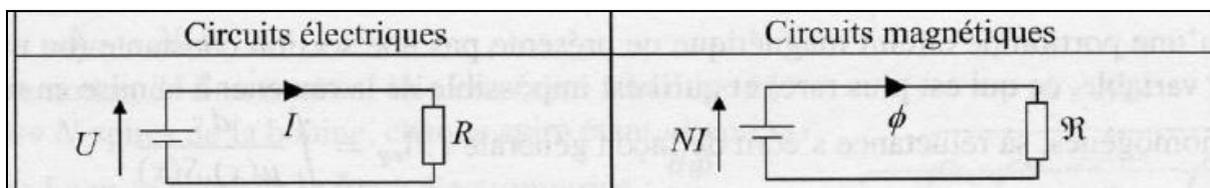
On appelle R la réluctance du circuit magnétique. La réluctance est une quantité qui caractérise la "résistance" du circuit magnétique au passage du flux. C'est un peu comme la loi d'Ohm pour des circuits magnétiques.

La réluctance d'un circuit de surface A , de longueur moyenne l et perméabilité μ est :

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A}$$

La réluctance est exprimée en At/Wb.

8. Analogie entre les circuits magnétiques et électriques Circuit :



Circuit électrique	Circuit magnétique
Tension $V=RI$	Force magnétomotrice $\mathfrak{F} = NI$
Résistance R	Réluctance \mathfrak{R}
Courant I	Flux φ

Réluctance en série

La réluctance en série se comporte de la même façon que des résistances en série. C'est-à-dire :

$$\mathfrak{R}_{eq} = \mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_2 + \dots$$

Réluctance en parallèle :

$$\frac{1}{\mathfrak{R}_{eq}} = \left(\frac{1}{\mathfrak{R}_1} + \frac{1}{\mathfrak{R}_2} + \dots \right)$$

Chapitre III. Les transformateurs

1. Introduction

La production, le transport et la distribution de l'énergie électrique, s'effectue principalement sous forme de tension et de courant alternatif. Il est difficile de produire ou de distribuer cette énergie à haute tension. Par contre un transport économique de cette énergie à grandes distances ne peut être réalisé qu'en haute tension. Ce problème est résolu à l'aide des transformateurs.

2. Définition

Un transformateur est une machine statique qui assure la conversion d'une tension alternative à une autre tension alternative mais de même fréquence. Il se compose d'un ou plusieurs enroulements de fil enroulés autour d'un noyau ferromagnétique commun. Habituellement, ces enroulements ne sont pas reliés électriquement. Ils sont reliés par le flux magnétique commun confiné dans le noyau. Les transformateurs sont généralement monophasés ou triphasés.

3. Rôle :

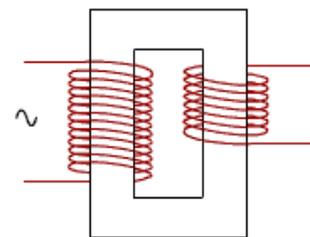
Les transformateurs sont principalement utilisés dans

- La gestion du transport et de distribution d'énergie
- la sécurité de la séparation électrique
- des circuits de mesure
- alimentation des circuits électroniques

4. Description

Un transformateur est un **circuit magnétique** fait de tôles magnétiques sur lequel on a placé des bobines de fil de cuivre isolé par du verni.

La bobine où arrive le courant est appelée "**enroulement primaire**", celle qui produit une autre tension est appelée "**secondaire**". Certains transformateurs possèdent plusieurs enroulements secondaires pour fournir plusieurs tensions en sortie.



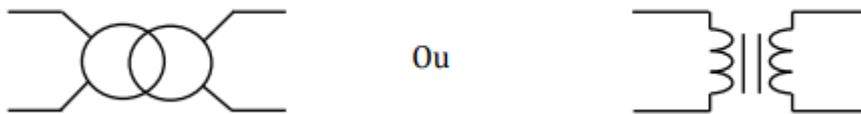
5. Principe de fonctionnement

Un transformateur comprend essentiellement deux circuits électriques montés sur un circuit magnétique, l'un des circuits électriques dit enroulement primaire comporte N_1 spires étant

raccordé à une source de tension alternatif U_1 , le courant I_1 qui traverse cet enroulement donne naissance à un flux ϕ dans le circuit magnétique. Ce flux induit une force électromotrice dans le deuxième enroulement dit « enroulement secondaire » de N_2 spires aux bornes duquel apparaît une tension U_2 .

6. Représentation symbolique

Ci-contre, deux symboles graphiques rencontrés pour la représentation des transformateurs dans les schémas électriques ou électroniques.



7. Rapport de transformation

$$m = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Si $m < 1$ ou $N_2 > N_1$, le transformateur est dit élévateur de tension

Si $m > 1$ ou $N_2 < N_1$, il s'agit d'un abaisseur de tension.

8. Transformateur idéal

On définit un transformateur idéal ayant les caractéristiques suivantes :

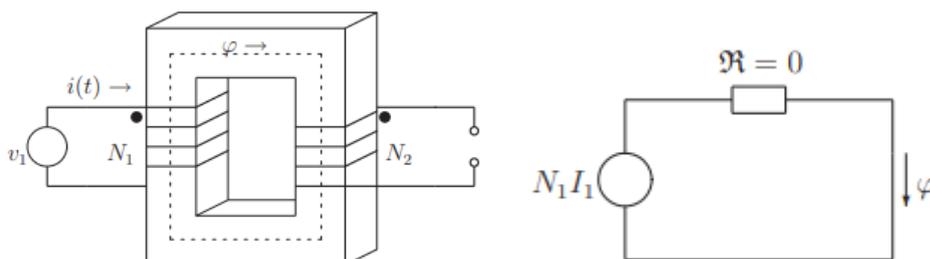
- La résistance dans les fils (au primaire et secondaire) est nulle.
- Le noyau magnétique est parfait ($\mu_r = \infty$, $\rho = 0$).

Si on étudie les implications de ces simplifications, on voit que la reluctance du noyau sera nulle, et donc il n'y a pas de fuite. Le flux est donc totalement contenu à l'intérieur du noyau.

Le couplage magnétique entre le primaire et le secondaire est parfait ; tout le flux du primaire se rend au secondaire.

8.1. Fonctionnement à vide

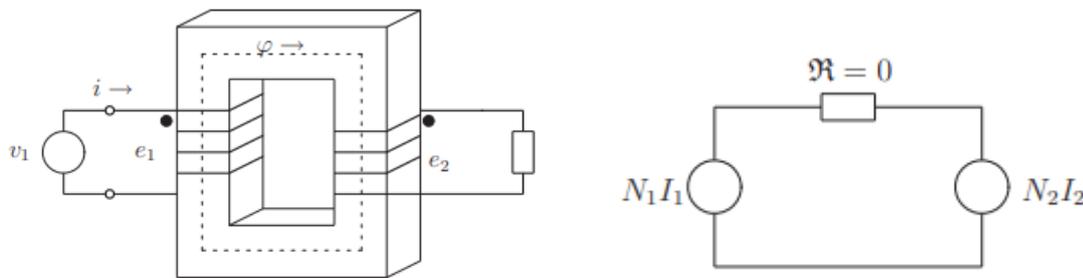
Le fonctionnement à vide du transformateur est obtenu lorsqu'on ne branche aucune charge au secondaire. Ceci nous donne le circuit suivant :



Le flux magnétique ϕ est différent de zéro mais la force magnétomotrice de la bobine au primaire est nulle, puisque $N_1 I_1 = R\phi = 0$. Le courant dans la bobine au primaire est nul.

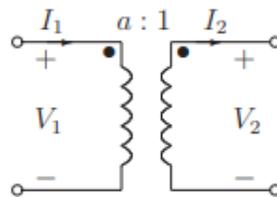
8.2. Fonctionnement en charge du transformateur idéal

Lorsqu'on branche une charge au secondaire, avec une source sinusoïdale, on obtient le circuit suivant:



La réluctance est nulle parce que la perméabilité μ est infinie. Donc, on obtient :

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = R\phi = 0$$



Circuit équivalent du transformateur idéal, en charge

9. Transformateur réel

Le transformateur réel ne possède pas des caractéristiques parfaites comme le transformateur idéal. On doit tenir compte de :

1. Noyau magnétique. Le noyau possède une caractéristique $B(H)$ non-linéaire, avec hystérésis, et une perméabilité non-infinie ($\mu_r \neq \infty$).

2. Bobinages. Les bobinages sont en cuivre, ayant une résistivité non-nulle ($\rho \neq 0$). Compte tenu de ces caractéristiques, on peut déduire six sources de pertes dans le transformateur :

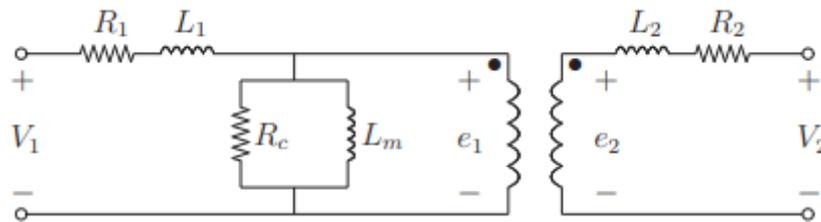
1. Puisque la perméabilité μ du noyau est non-infinie, la réluctance du noyau ne sera pas nulle. Il y a par conséquent des fuites de flux : (a) au primaire (b) au secondaire

2. On a déjà vu qu'il existait des fuites par hystérésis et des fuites par courants de Foucault.

3. La résistivité des fils de cuivre implique une résistance interne au primaire et au secondaire.

10. Circuit équivalent du transformateur réel

On peut représenter Les pertes par des éléments de circuit équivalent de la suivante. On regardera ensuite la raison pour chacun de ces éléments.



Circuit équivalent du transformateur avec charge au secondaire

Effet de μ : Puisque la perméabilité du noyau est finie, la reluctance sera non-nulle. Par conséquent, pour créer le flux ϕ dans le noyau, il faut un courant i_m . Ceci peut être représenté par une inductance L_m , qu'on appelle une inductance magnétisante.

Pertes dans le noyau : On représente les pertes dans le noyau par une résistance R_c en parallèle avec l'inductance magnétisante L_m

Fuites au primaire et secondaire : On représente ces pertes par des inductances L_1 et L_2 , pour le primaire et le secondaire, respectivement.

Résistance des fils : On représente la résistance des fils de cuivre par des résistances R_1 et R_2 pour le primaire et le secondaire, respectivement.

11. Les transformateurs de mesure

Les transformateurs de mesure font l'interface entre le réseau électrique et un appareil de mesure. La puissance disponible au secondaire est définie suivant les besoins de l'appareil de mesure.

Selon la définition de la Commission électrotechnique internationale, un transformateur de mesure est un transformateur conçu pour transmettre un signal d'information à des appareils de mesure, à des compteurs, à des systèmes de protection ou de commande.

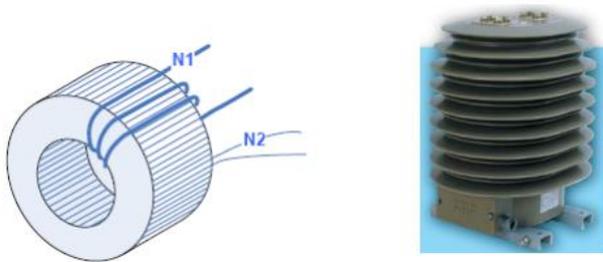
11.1. Les transformateurs de tension : TT Ils permettent de mesurer une tension du domaine de la H.T avec une bonne précision et sans intervention sur l'installation haute tension. L'isolation galvanique réalisée par le transformateur isole et sécurise l'utilisateur et le matériel car la tension recueillie aux bornes du secondaire appartient au domaine B.T : 100 à 110V en général.

On utilise aussi le terme **transformateur de potentiel**.

11.2. Les transformateurs de courant : TI ou TC On utilise les transformateurs de courant (TC) en B.T et en H.T lorsque l'on veut mesurer avec précision des courants de très forte valeur.

a. Constitution

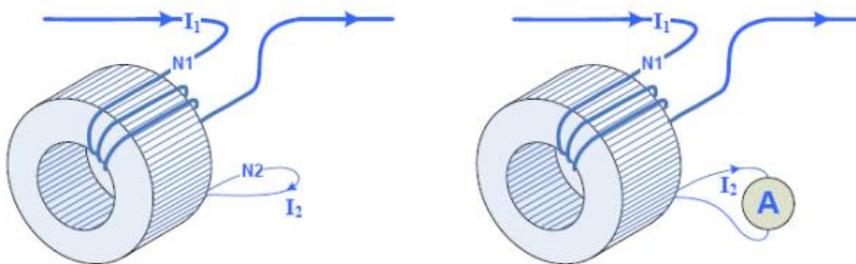
Un TC possède 2 circuits : ► Un primaire : N_1 ► Un secondaire : N_2 ► Un circuit magnétique cylindrique (torique)



b. Raccordement

- Le primaire du TC doit être traversé par le courant I_1 dont on veut connaître la valeur.
- Le secondaire mis en court circuit génère le courant I_2 lié à I_1 par le rapport de

transformation $m: I_2 = \frac{I_1}{m}$. Il suffit d'insérer un ampèremètre dans l'enroulement secondaire pour connaître la valeur de I_2 et par conséquent de I_1 .



12. L'autotransformateur

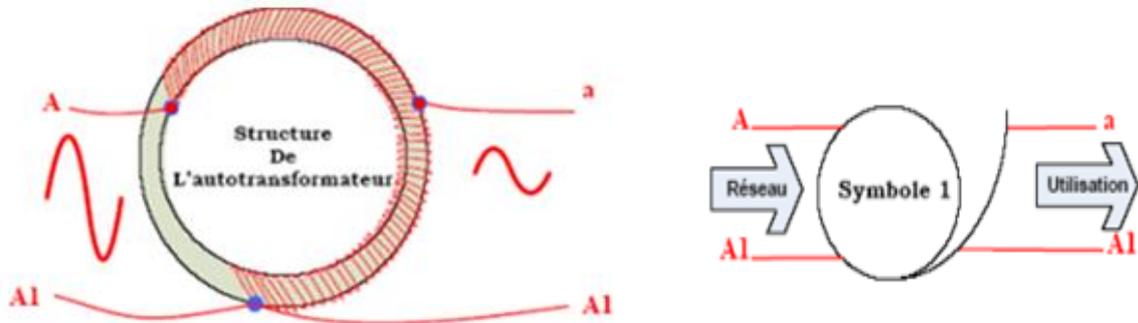
L'autotransformateur, comme le transformateur, permet « d'adapter » une tension destinée à alimenter un appareil ou un groupe d'appareils.

En revanche, contrairement au transformateur, il ne permet pas de modifier le régime de neutre du circuit alimenté car ne possédant qu'un seul enroulement il ne réalise pas l'isolation galvanique : (voir schéma ci-dessous)

Une utilisation de autotransformateur classique est dans la conversion entre les tensions de réseau en cours d'utilisation dans divers pays du monde (220 V, 240 V, 110 V). Ils sont également utilisés dans les moteurs thermiques à allumage commandé, afin de générer l'étincelle électrique.

a. Constitution et raccordement des autotransformateurs

Autotransformateur monophasé :



Autotransformateur triphasé :

