

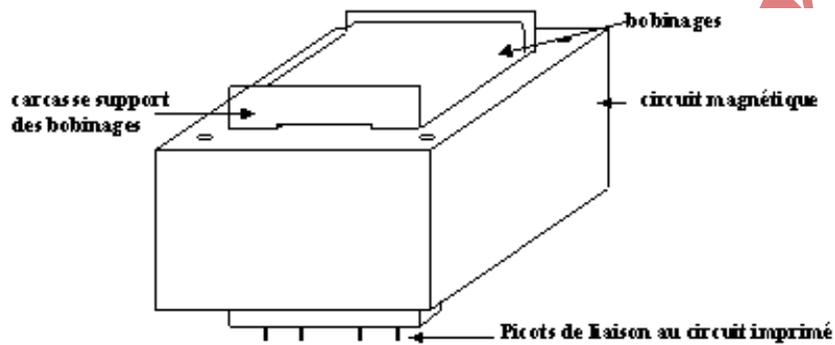
Chapitre 03 : Les transformateurs

1. Définition

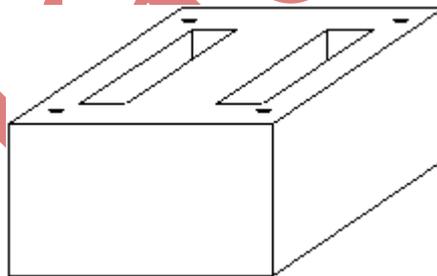
Le transformateur est un convertisseur d'énergie électrique AC /AC isolé. Les deux fonctions principales sont la transmission isolée d'énergie et la modification du niveau d'une source alternative.

Exemple de constitution :

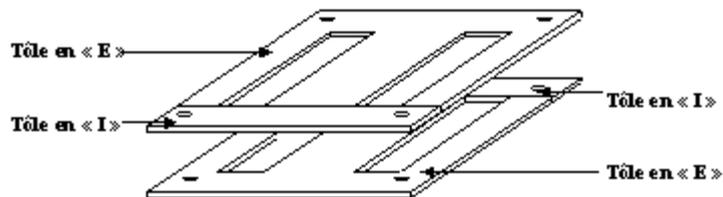
Aspect extérieur :



Circuit magnétique seul :



2. Réalisation du circuit magnétique par empilement de tôles



Les tôles ont une épaisseur entre 0,4 et 0,7 mm en fonction du soin qui est exigé par l'application. L'empilement de plan des tôles en " E " et en " I " avec alternance des joints

entre le " E " et le " I " permet de fabriquer le circuit magnétique. L'ensemble forme un bloc cohérent quand cet ensemble est collé ou par serrage grâce aux systèmes vis écrous qui prennent place dans les trous. Les plans de tôle sont isolés entre eux par l'oxydation naturelle des tôles ou par un vernis. Ainsi les pertes par courant de Foucault sont limitées. Position des enroulements sur la carcasse

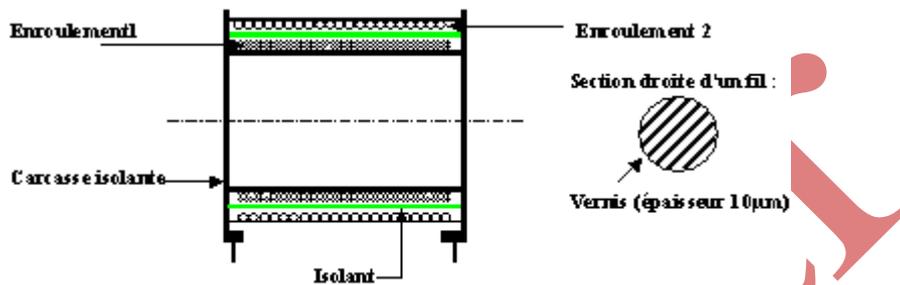


Figure 1 : Position des enroulements sur la carcasse

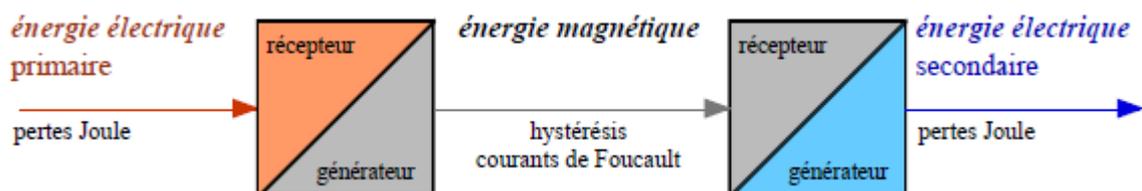
Chaque spire est isolée de sa voisine grâce au vernis isolant déposé sur le fil du bobinage. Une fois le bobinage constitué, la carcasse et ses enroulements sont déshydratés et imprégnés avec un vernis qui polymérise en étuve.

3. Modélisation du transformateur

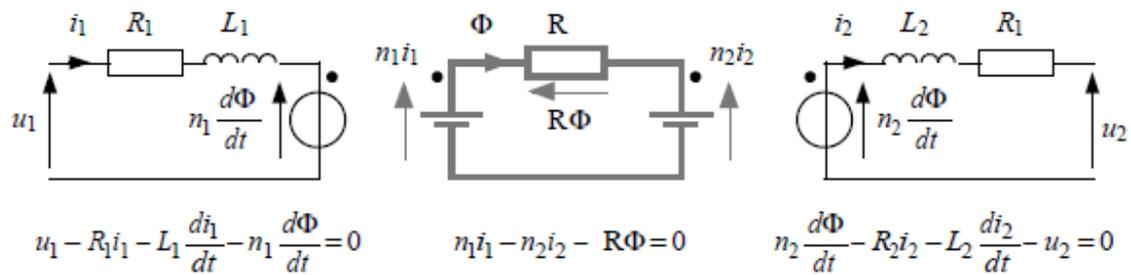
3.1- Symboles :



3.2- Bilan énergétique du transformateur:



3.3- Circuits électriques et magnétique:



Ou :

R : résistances des fils de bobinage

L : inductances dues aux fuites magnétiques

La réluctance du circuit magnétique (supposé linéaire)

Φ : flux du champ magnétique

n.i : forces magnétomotrices ou "ampères-tours"

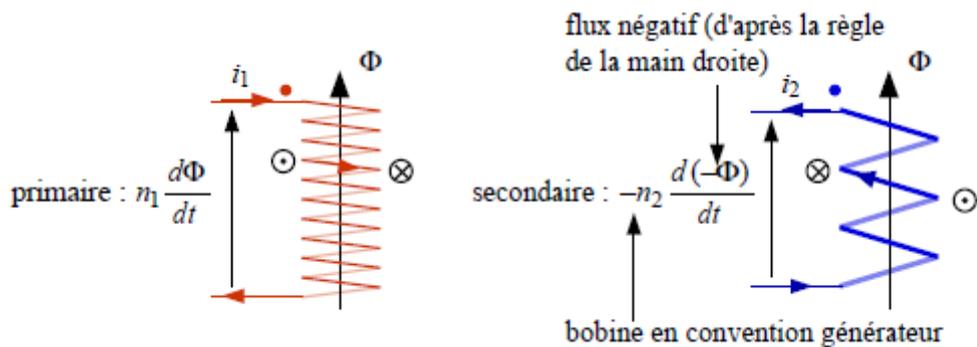


Figure 2 : Modèle électrique du transformateur parfait en régime alternatif sinusoïdal

Le transformateur est "parfait" si *toutes* les pertes (électriques et magnétiques) sont négligées :

$$\left. \begin{aligned} u_1 - n_1 \frac{d\Phi}{dt} &= 0 \\ n_2 \frac{d\Phi}{dt} - u_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{U_2}{U_1} = m \quad \text{en posant : } m = \frac{n_2}{n_1}$$

$$n_1 i_1 - n_2 i_2 = 0 \Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{m}$$

et : $\frac{U_2}{I_2} = m^2 \frac{U_1}{I_1}$

Rendement : le rendement est donc $\eta = 100\%$. L'angle φ est le même au primaire et au secondaire, car le facteur de puissance $\cos \varphi$ au primaire est imposé par le facteur de puissance du récepteur.

Comme $\cos \varphi = 1$, on a donc : $U_{1\text{eff}} \cdot I_{1\text{eff}} \cdot \cos \varphi = U_{2\text{eff}} \cdot I_{2\text{eff}} \cdot \cos \varphi$

Puissance apparente : $S = U_{1\text{eff}}.I_{1\text{eff}} = U_{2\text{eff}}.I_{2\text{eff}}$ [V.A]

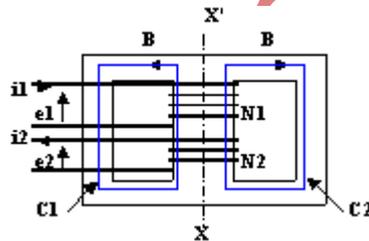
3.4- Transformateur idéal :

Hypothèses :

- pas de pertes dans les conducteurs,
- pas de pertes dans le noyau magnétique,
- perméabilité infinie du circuit magnétique,
- couplage magnétique parfait des enroulements.

Équations :

Le noyau magnétique de section droite S est homogène.



Les deux contours $C1$ et $C2$ sont symétriques par rapport à l'axe XX' et enlacent les mêmes courants et s'appuient sur des circuits magnétiques de mêmes dimensions. C'est donc la même induction B qui circule sur ces deux contours.

$$e1 = -N1.S.db/dt$$

$$e2 = -N2.S.db/dt$$

Dans l'hypothèse d'une perméabilité infinie, $e2/e1 = N2/N1 = i1/i2 = m$ où m est le rapport de transformation.

Observations :

- Le transformateur ne supporte pas les tensions continues.
- Si la source d'énergie est connectée à l'enroulement 1, cette dernière porte le nom de primaire, l'enroulement 2 s'appelle alors le secondaire.
- La forme d'onde de $e2$ est la même que celle de $e1$.
- La forme d'onde de $i1$ est la même que celle de $i2$.
- Les signaux doivent être alternatifs (sinusoïdaux, carrés, triangulaires,...).
- $e1.i1 = e2.i2$, la puissance instantanée appliquée au primaire est directement transférée au secondaire sans accumulation d'énergie. D'autre par la puissance est

conservée bien que les tensions et courants au primaire et au secondaire soient différents.

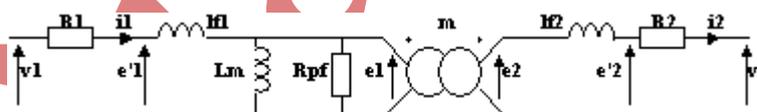
- Si la source d'énergie est une source de tension, la tension e_1 est imposé et indirectement e_2 telle que $e_2 = m.e_1$. La charge connectée au secondaire appelle un courant i_2 (loi d'Ohm). Le courant i_1 est alors la conséquence de i_2 au rapport m près.
- Si la source d'énergie est une source de courant, le courant i_1 est imposé et indirectement i_2 tel que $i_2 = i_1/m$. La charge connectée au secondaire du fait de ses propriétés détermine la tension e_2 . La tension e_1 est alors la conséquence de e_2 au rapport m près.

3.4- Transformateur réel :

Bilan des imperfections :

- Pertes par effet Joule dans les conducteurs,
- Pertes dans le noyau magnétique par courant de Foucault et par hystérésis,
- perméabilité finie du circuit magnétique,
- couplage magnétique imparfait des enroulements.

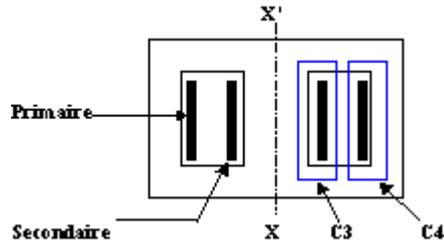
Modélisation du transformateur réel :



Les éléments du modèles sont parfaits et chacun correspond à la prise en compte d'une imperfection autour d'un transformateur parfait de rapport de transformation m :

- R_1 = résistance du fil de l'enroulement primaire.
- R_2 = résistance du fil de l'enroulement secondaire.
- m = rapport de transformation.
- R_{pf} est une résistance image des pertes fer (Pf).
- L_m est l'inductance de magnétisation.

$$N_1.i_1 - N_2.i_2 = R.L_m.i_{10} \quad (R \text{ est la réluctance du noyau magnétique}).$$



4- Transformateurs spéciaux

Dans les applications industrielles, on rencontre un grand nombre de transformateurs de construction spéciale. La plupart possèdent les propriétés de base tel que :

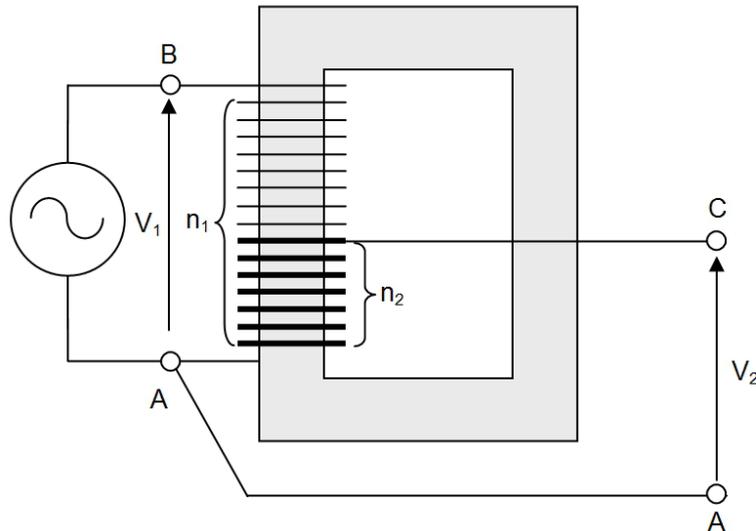
- La tension induite dans un enroulement est proportionnelle au nombre de spires ;
- Lorsque le transformateur est en charge, les ampères-tours du primaire sont égaux aux ampères-tours du secondaire ;
- Le courant absorbé à vide (courant d'excitation absorbé en permanence) est négligeable par rapport à la valeur du courant de pleine charge du primaire.

4.1 Autotransformateur

On appelle autotransformateur, un transformateur composé d'un enroulement unique monté sur un circuit magnétique. Pour un autotransformateur abaisseur, par exemple, la haute tension est appliquée à l'enroulement complet et la basse tension est obtenue entre une extrémité de l'enroulement et une prise intermédiaire.

Soit un autotransformateur (Figure 3) composé d'un enroulement AB de n_1 spires monté sur un circuit magnétique. L'enroulement est raccordé à une source de tension constante V_1 . Le courant d'excitation crée un flux et, comme dans tout transformateur, ce flux demeure constant tant que V_1 est constant.

Supposons que l'on sorte une prise C entre les extrémités A et B de l'enroulement, et que n_2 spires soient comprises entre les bornes A et C. Comme la tension induite est proportionnelle au nombre de spires, la tension entre ces bornes est :



$$V_2 = \frac{n_1}{n_2} V_1$$

Cette relation est la même que celle obtenue avec un transformateur conventionnel à deux enroulements ayant n_1 et n_2 spires respectivement au primaire et au secondaire. Cependant, comme les enroulements primaires AB et secondaire AC ont une borne commune A, ils ne sont plus isolés. Si l'on branche une charge entre les bornes A et C, le courant I_2 provoque la circulation d'un courant I_1 au primaire (voir figure 4).

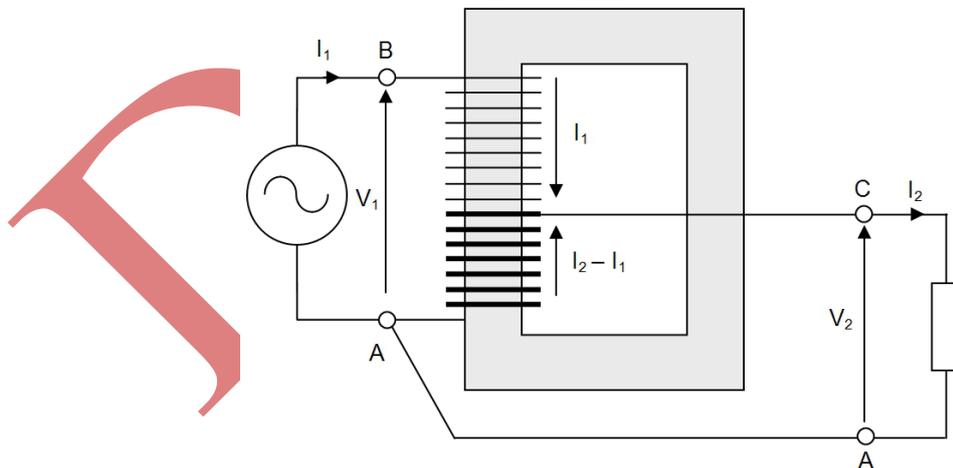


Figure 4. Tensions et courants dans un autotransformateur.

La section BC de l'enroulement est traversée par le courant I_1 . D'après la loi des nœuds appliquée en A, la section CA est traversée par une intensité $(I_2 - I_1)$. De plus, la force magnétomotrice créée par I_1 doit être égale et opposée à celle produite par $(I_2 - I_1)$. On a donc :

$$I_1 (n_1 - n_2) = (I_2 - I_1) n_2$$

Soit : $n_1 I_2 = n_2 I_1$

Enfin, si l'on suppose que les pertes fer et le courant magnétisant sont négligeables, la puissance apparente absorbée par la charge doit être égale à celle fournie par la source. Par conséquent, $V_1 I_1 = V_2 I_2$.

On constate que ces équations sont identiques à celles obtenues avec un transformateur conventionnel ayant un rapport de transformation n_2 / n_1 . Cependant, dans un autotransformateur, l'enroulement secondaire fait partie de l'enroulement primaire. Il s'ensuit qu'un autotransformateur est plus petit, moins lourd et moins coûteux qu'un transformateur conventionnel de même puissance. Cette économie devient particulièrement importante lorsque le rapport de transformation se situe entre 0,5 et 2. Par contre, l'absence d'isolation entre la haute tension et la basse tension constitue un inconvénient parfois prohibitif. Les autotransformateurs servent au démarrage à tension réduite des moteurs, à la régulation de la tension des lignes de distribution et, en général, à la transformation de tensions de valeurs assez rapprochées.

Un transformateur à deux enroulements peut être monté en autotransformateur : il suffit de relier le secondaire en série avec le primaire. Selon le mode de connexion, la tension secondaire peut s'ajouter à la tension primaire ou se soustraire de celle-ci. Lorsqu'on utilise des transformateurs conventionnels comme autotransformateurs, il est important d'appliquer les règles suivantes :

- Le courant dans un enroulement ne doit pas dépasser la valeur nominale ;
- la tension aux bornes d'un enroulement ne doit pas être supérieure à la valeur nominale ;
- si le courant nominal circule dans un enroulement, le courant nominal circule automatiquement dans l'autre (égalité des ampères-tours dans les deux enroulements) ;
- si la tension nominale apparaît aux bornes d'un enroulement, la tension nominale correspondante apparaît automatiquement aux bornes de l'autre.

4.2 Autotransformateur variable

Lorsque l'on a besoin d'une tension variable de 0 à 220 V ou plus, on a souvent recours à un autotransformateur ayant une prise mobile (Figure 3). Le transformateur comprend un enroulement d'une seule couche de fil bobiné sur un noyau magnétique toroïdal et un balai en graphite mobile que l'on peut déplacer au moyen d'un bouton de réglage. Le balai glisse sur les spires, et à mesure que le point de contact se déplace, la tension V_2 augmente proportionnellement au nombre de spires parcourues.

4-3-Transformateur de tension (TT)

Les transformateurs de tension sont utilisés sur les lignes à haute tension pour alimenter des appareils de mesure (voltmètre, wattmètre, etc.) ou de protection (relais). Ils servent à isoler ces appareils de la haute tension et à les alimenter à des tensions appropriées. Le rapport de transformation est choisi de façon que la tension secondaire soit d'une centaine de volts, ce qui permet l'utilisation d'instruments de fabrication courante pour la mesure de tension élevées.

Le primaire des transformateurs de tension est branché en parallèle avec le circuit dont on veut connaître la tension. Leur construction diffère très peu de celle des transformateurs conventionnels. Cependant, leur puissance nominale est généralement faible (inférieure à 500 VA) de sorte que le volume de l'isolation dépasse souvent celui du cuivre et de l'acier utilisé.

Les transformateurs de tension installés sur les lignes HT sont toujours raccordés entre une ligne et le neutre. Cela élimine la nécessité d'utiliser deux grosses bornes de porcelaine, une des deux extrémités de l'enroulement étant reliée à la terre



Figure 5 – Autotransformateurs variable (autotransformateur)

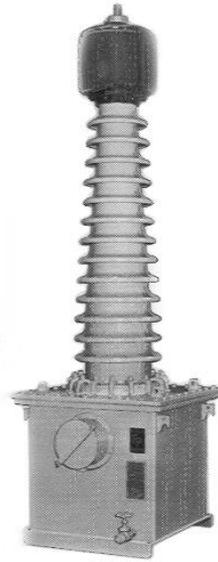


Figure 6– Transformateur de tension.

4.4 Transformateur de courant (TI)

Les transformateurs de courant sont utilisés pour ramener à une valeur facilement mesurable les courants intenses des lignes à haute ou à basse tension. Ils servent également à isoler les appareils de mesure ou de protection des lignes à haute tension (Figure 7). Le primaire de ces transformateurs est monté en série avec la ligne dont on veut mesurer l'intensité. Ces transformateurs étant employés seulement à des fins de mesure et de protection, leur puissance sera faible, de l'ordre de 15 à 200 VA. Le courant nominal secondaire est généralement compris entre 1 et 5 A.



Figure 7 – Transformateur de courant.

Dr. F. Djaafar