

## 14.1 Généralités

### 14.1.1 Définition

Le transformateur est un appareil statique à induction permettant de transformer un système de tension alternatif en un autre système alternatif, de tension et intensité généralement différentes.

### 14.1.2 Constitution du transformateur à enroulements séparés

#### Principe

Le transformateur comporte deux parties principales :

- le circuit magnétique fermé en fer feuilleté ;
- deux ou plusieurs enroulements isolés les uns des autres disposés autour des noyaux ou colonnes.

### 14.1.3 Circuit magnétique

Le circuit magnétique se présente, suivant les constructions, de trois façons différentes :

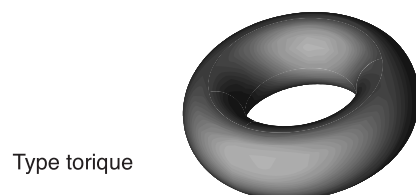
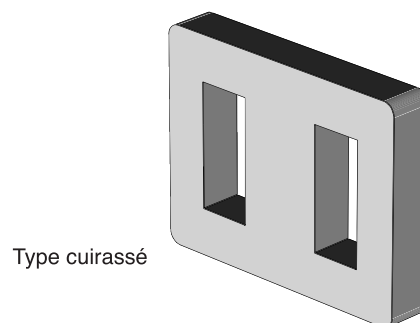
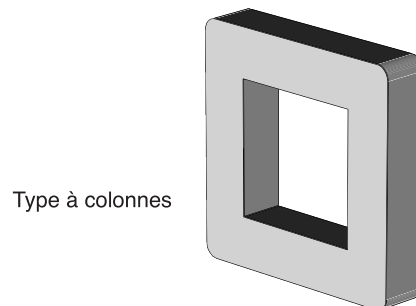
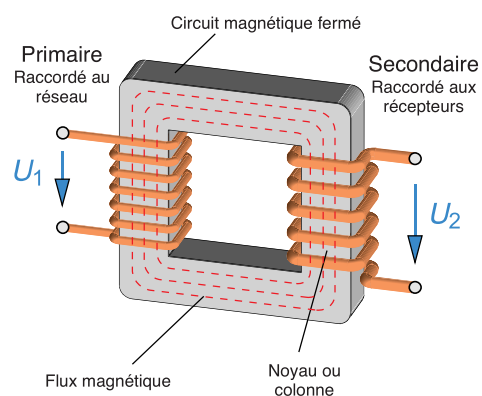
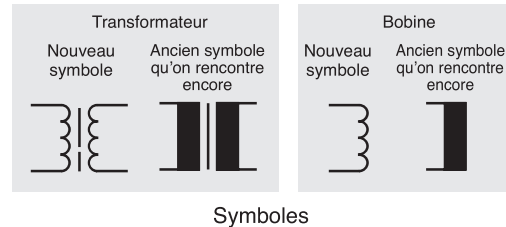
- transformateur avec circuit à colonnes ;
- transformateur avec circuit cuirassé ;
- transformateur avec circuit torique.

Le circuit magnétique ou carcasse est fabriqué en tôles d'acier doux (0,3 à 0,5 mm d'épaisseur) contenant de 2,5 à 4% de silicium. Les tôles sont isolées entre elles afin de réduire les courants de Foucault induits dans le fer par le flux magnétique alternatif.

Le transformateur cuirassé convient bien aux transformateurs monophasés.

#### Remarque

Pour les petits transformateurs utilisés en moyenne et haute fréquence, le circuit magnétique est souvent en ferrite, afin de limiter les pertes fer.

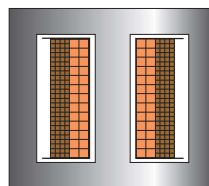




#### 14.1.4 Enroulements

Les enroulements d'un transformateur sont réalisés en fil de cuivre (ou aluminium) isolé au moyen d'un vernis. Ils sont disposés sur un corps de bobine isolant.

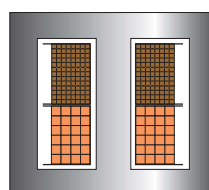
On distingue deux types d'enroulement :



- les enroulements concentriques ;
- les enroulements en galets (ou alternés).



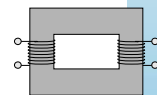
-  Bobinage secondaire (basse tension)
-  Bobinage primaire (haute tension)

Enroulements concentriques



-  Bobinage secondaire
-  Bobinage primaire

Enroulements en galets



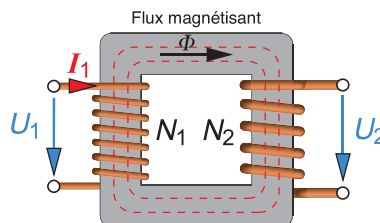
## 14.2 Fonctionnement

### 14.2.1 Principe

A vide, c'est-à-dire sans charge, l'enroulement primaire, parcouru par un courant alternatif, produit dans le circuit magnétique un flux magnétique. Ce dernier suit fidèlement les variations du courant primaire.

L'enroulement secondaire, traversé par ce flux variable, est alors le siège d'une FEM induite, également alternative, en retard sur le flux d'un quart de période.

Une FCEM est également induite dans l'enroulement primaire.



#### Formules

La valeur de la FEM induite (tension secondaire) est donnée par la relation suivante :

$\hat{E}_2$  FEM induite [V] (valeur de crête)

$N_2$  nombre de spires au secondaire

$\Delta\Phi$  variation de flux magnétique [Wb]

$\Delta t$  durée de la variation du flux [s]

Appliquée aux grandeurs alternatives sinusoïdales, cette relation devient :

$E_2$  FEM induite [V] (valeur efficace)

$\omega$  pulsation [rad/s]

$B_{\max}$  induction magnétique maximale [T]

$A$  section du circuit magnétique [m<sup>2</sup>]

$$\hat{E}_2 = \frac{N_2 \cdot \Delta\Phi}{\Delta t}$$

$$E_2 = \frac{\omega \cdot N_2 \cdot B_{\max} \cdot A}{\sqrt{2}}$$

#### Fonctionnement à vide

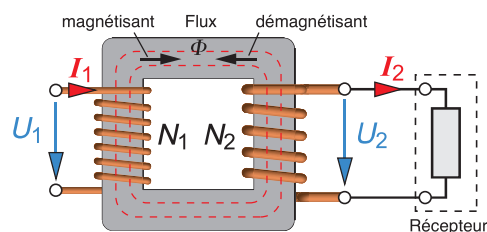
Le transformateur se comporte comme une self. La FCEM induite dans l'enroulement primaire limite fortement le courant.

### Fonctionnement en charge

Le courant demandé par le récepteur traverse l'enroulement secondaire et produit, dans le circuit magnétique, un flux démagnétisant qui s'oppose au flux magnétisant primaire (loi de Lenz). Il en résulte une diminution de l'induction dans le circuit magnétique et de la FCEM et, par conséquent, de l'impédance de l'enroulement primaire. La tension primaire étant constante, le courant primaire augmente et compense l'effet démagnétisant du courant secondaire. L'équilibre se rétablit entre les ampères-tours primaire et secondaire.

Un transformateur alimenté à tension constante fonctionne à flux constant.

Dans un transformateur, la puissance demandée au secondaire se reporte automatiquement au primaire.



### 14.2.2 Relations importantes

En admettant que le transformateur fonctionne sous charge nominale, on peut poser les relations suivantes.

Les noyaux primaire et secondaire sont traversés par le même flux. Par conséquent, chaque spire est le siège d'une même FEM désignée par  $E_0$ .

$$E_1 = N_1 \cdot E_0 \quad \text{et} \quad E_2 = N_2 \cdot E_0 \quad \text{d'où:} \quad \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1 \cdot E_0}{N_2 \cdot E_0}$$

En simplifiant par  $E_0$ , nous obtenons le rapport des nombres

$$\text{de spires:} \quad \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$

Les pertes étant faibles, on peut admettre que :

$$U_1 \approx E_1 \quad \text{et} \quad U_2 \approx E_2 \quad \text{d'où:} \quad \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{N_1}{N_2}.$$

Les tensions sont proportionnelles au nombre de spires.

Le rapport  $\frac{U_1}{U_2}$  ou  $\frac{N_1}{N_2}$  représente le « rapport des nombres de spires » du transformateur désigné par  $n$ .

La puissance primaire est environ égale à la puissance secondaire.

$$P_1 \approx P_2 \quad \text{donc:} \quad U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \approx U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2$$

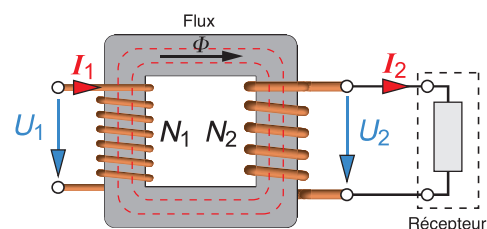
$$\cos \varphi_1 \approx \cos \varphi_2 \quad \text{d'où:} \quad S_1 \approx S_2 \quad \text{et} \quad \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$$

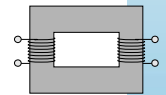
Les tensions sont inversement proportionnelles aux intensités des courants.

Le nombre d'ampères-tours du primaire est approximativement égal au nombre d'ampères-tours du secondaire.

$$N_1 \cdot I_1 \approx N_2 \cdot I_2 \quad \text{d'où:} \quad \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$$

Les nombres de spires sont inversement proportionnels aux courants.





14

Transformateurs

### Formules

$U_1$  tension au primaire [V]

$U_2$  tension au secondaire [V]

$N_1$  nombre de spires au primaire

$N_2$  nombre de spires au secondaire

$I_1$  intensité du courant au primaire [A]

$I_2$  intensité du courant au secondaire [A]

$n$  rapport des nombres de spires

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$$

$$n = \frac{N_1}{N_2}$$

### Exemple

Un transformateur de 100 kVA est branché sous 12 kV. Le primaire possède 4000 spires. La tension doit être abaissée à 230 V.

Calculer :

- le nombre de spires du secondaire ;
- l'intensité des courants primaire et secondaire ;
- le rapport des nombres de spires.

Nombre de spires du secondaire :

$$N_2 \approx \frac{U_2 \cdot N_1}{U_1} = \frac{230 \cdot 4000}{12000} = \mathbf{77 \text{ spires}}$$

Intensité du courant primaire :

$$I_1 = \frac{S_1}{U_1} = \frac{100000}{12000} = \mathbf{8,34 \text{ A}}$$

Intensité du courant secondaire :

$$I_2 = \frac{S_2}{U_2} = \frac{100000}{230} = \mathbf{435 \text{ A}}$$

Rapport des nombres de spires :

$$n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{4000}{77} = \mathbf{52}$$

### 14.2.3 Pertes dans les transformateurs

Les pertes, dans les transformateurs, se répartissent en deux catégories principales :

- les pertes dans le fer  $P_{Fe}$  ;
- les pertes dans le cuivre  $P_{Cu}$  .

Les pertes dans le fer sont produites par les courants de Foucault et par hystérésis dans le circuit magnétique.

Ces pertes dépendent :

- de la qualité des tôles (épaisseur, composition, masse) ;
- du genre de construction ;
- de l'induction maximale ;
- de la fréquence.

Si la tension primaire et la fréquence sont constantes, les pertes dans le fer sont constantes et indépendantes de la charge du transformateur.

En pratique, la puissance absorbée par le transformateur à vide correspond aux pertes dans le fer ; elles se mesurent par un essai à vide.

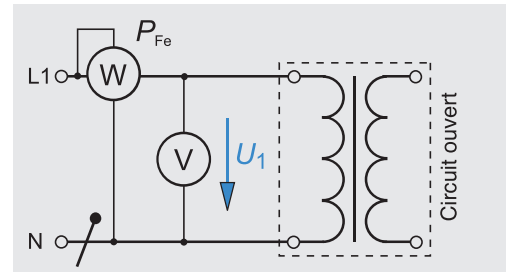
En charge, les pertes dans le cuivre sont produites par effet Joule dans les enroulements.

Ces pertes dépendent :

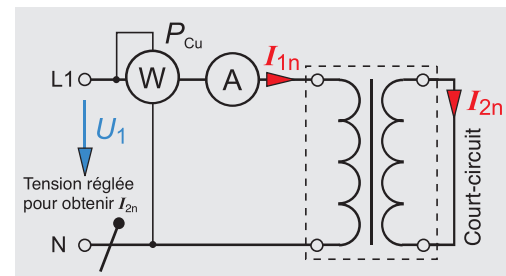
- de la résistance des enroulements primaire et secondaire ;
- de l'intensité du courant primaire et secondaire.

$$\text{D'où : } P_{Cu} = P_{Cu1} + P_{Cu2} = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2$$

Les pertes dans le cuivre se mesurent lors d'un essai en court-circuit à tension réduite (les pertes dans le fer sont négligeables dans ce cas).



Essai à vide



Essai en court-circuit

### 14.2.4 Rendement

Le rendement est le rapport de la puissance fournie (débitée)  $P_2$  et la puissance absorbée  $P_1$ .

Le rendement des transformateurs est excellent. Il peut atteindre 99% (et plus) pour les très grosses unités.

#### Formules

$\eta$  rendement [–]

$P_1$  puissance absorbée [W]

$P_2$  puissance fournie [W]

$P_{Fe}$  pertes dans le fer [W]

$P_{Cu}$  pertes dans le cuivre [W]

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}}$$