

*Chapitre V*

*Les transformateurs*



## V.1 Introduction

Le transformateur permet de *transférer de l'énergie* (sous forme alternative) *d'une source à une charge*, tout en *modifiant la valeur de la tension*. La tension peut être *soit augmentée ou abaissée* selon l'utilisation voulue. Le changement d'un niveau de tension à un autre se fait par *l'effet d'un champ magnétique*.

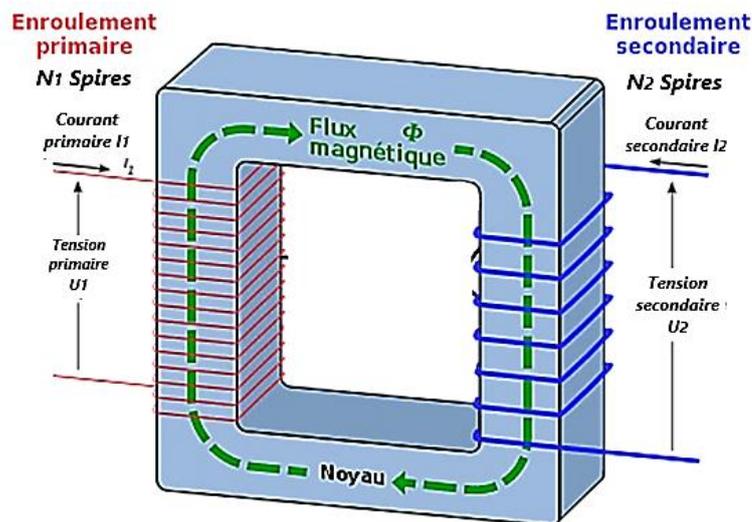
Parmi les applications des transformateurs, on note :

**Electronique** : alimentation à basse tension, adaptation d'impédances.

**Electrotechnique** : transformation de la tension pour le transport et la distribution d'électricité, alimentation à basse tension (par exemple, lampes halogènes).

## V.2 Principe de fonctionnement

Le transformateur est constitué de *deux enroulements* (ou plus) couplés sur un *noyau magnétique* (un matériau ferromagnétique)



Le côté de la *source* est appelé *primaire*. Le côté de la *charge* est appelée *secondaire*. Le flux  $\phi$  est le flux mutuel. Il faut remarquer *qu'il n'existe aucune connexion électrique* entre le primaire et le secondaire. Tout le *couplage* entre les deux enroulements est *magnétique*.

Lorsqu'on applique une *tension alternative* à la source, ceci *crée un flux alternatif* dans le noyau magnétique. Selon la loi de Faraday, ce flux crée des *forces électromotrices (fem)* dans les bobines. La *force électromotrice induite est proportionnelle au nombre de tours* dans la bobine et au taux de variation du flux.

Selon le *rapport du nombre de tours entre le primaire et le secondaire*, le secondaire alimente la charge avec une tension différente de celle de la source.

Si  $U_1 < U_2$ , le transformateur est dit *élévateur de tension* ;

Si  $U_1 > U_2$ , le transformateur est dit *abaisseur de tension* ;

Si  $U_1 = U_2$ , le transformateur est un *transformateur d'isolement* ;

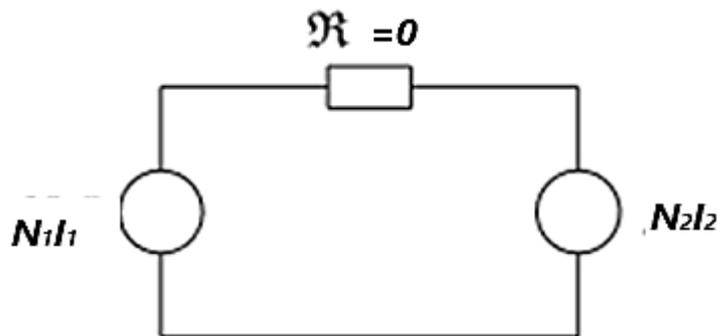
### V.3 Transformateur idéal

On définit un transformateur idéal ayant les caractéristiques suivantes :

1. La résistance dans les fils (au primaire et secondaire) est *nulle*.
2. Le noyau magnétique est parfait ( $\mu_r = \infty$ ).

Dans ce cas *la réluctance 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*. Le rendement dans ce cas est égal à 100%.

Le circuit équivalent du transformateur idéal est donc



Circuit équivalent du transformateur idéal

Le rapport de transformation  $K = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}$

### V.4 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 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. Pertes dans le *fer 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 et se traduit par *pertes Joules*.

Les conséquences de ces phénomènes parasites sont :

- Le rendement du transformateur est *inférieur à 100%*.
- Le rapport de tension entre le primaire et le secondaire ne sera pas exactement égal au rapport du nombre de tours.  $K = \frac{N_2}{N_1} \neq \frac{U_2}{U_1} \neq \frac{I_1}{I_2}$

### V.4.1 Circuit équivalent du transformateur réel

Avec tous les *phénomènes parasites* vus dans la section précédente, on peut représenter ces pertes par des éléments de circuit équivalent.

- **Pertes dans le noyau**

Puisque la perméabilité du noyau est finie, la réductance sera non-nulle. Par conséquent, *pour créer le flux  $\phi$  dans le noyau*, il faut un courant  $I_m$ . Ceci peut être représenté par une *inductance  $L_m$* , qu'on appelle une *inductance magnétisante*.

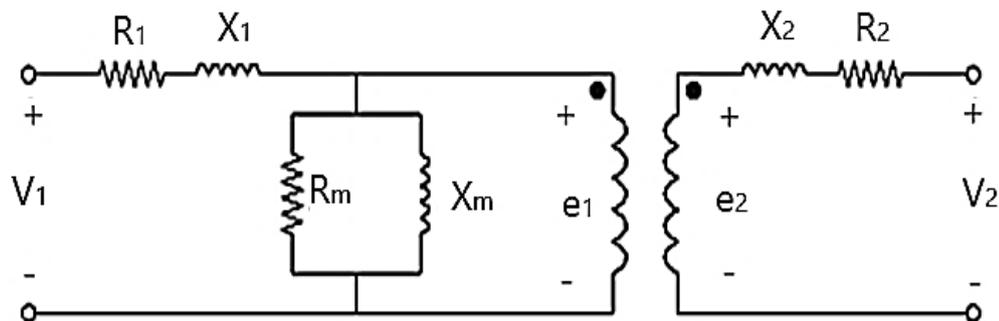
On représente les *perdes* dans le noyau par une *résistance  $R_m$*  en parallèle avec l'inductance magnétisante  $L_m$ .

- **Fuites au primaire et secondaire**

On représente ces pertes par des réactances inductives  $X_1$  et  $X_2$ , pour le primaire et le secondaire, respectivement.

- **Pertes par effet Joule**

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

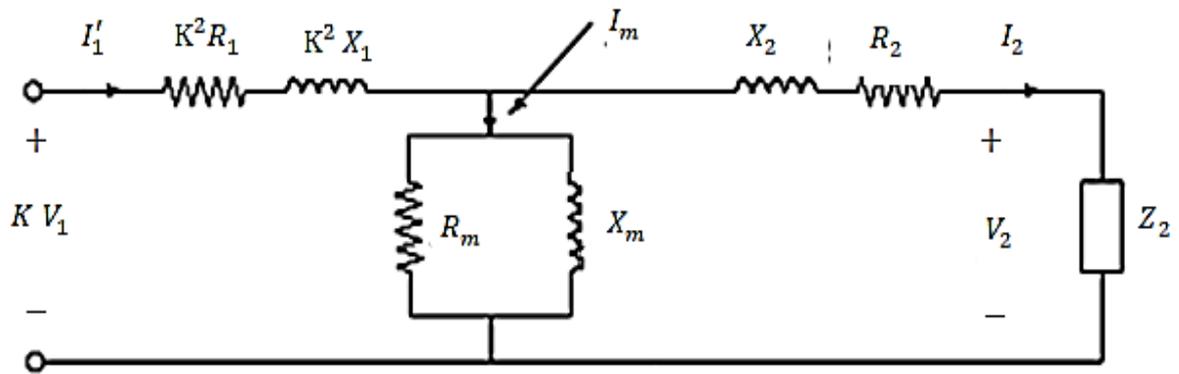


Pour faciliter l'analyse du circuit, on ramène les impédances du secondaire au primaire. Comme on peut ramener les paramètres primaires au secondaire. On obtient alors:

- **Paramètres primaires au secondaire**

$R_S = R_2 + k^2 R_1$  La résistance du transformateur ramenée au secondaire

$X_S = X_2 + k^2 X_1$  La réactance de fuites magnétiques ramenée au secondaire



De ce circuit, on définit :

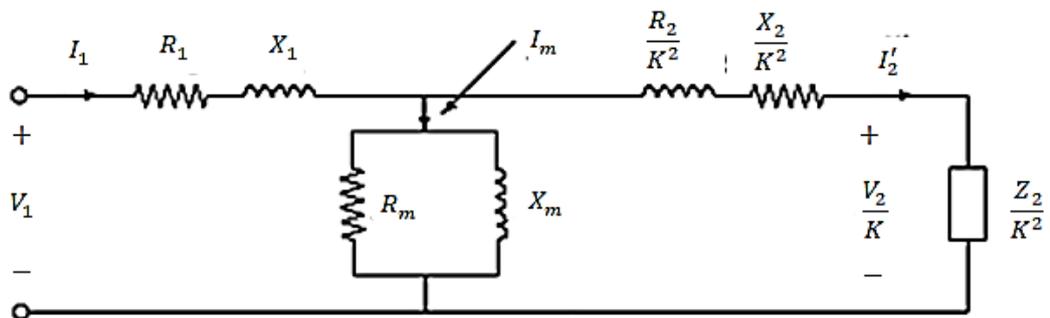
$$X'_1 = k^2 X_1 \quad R'_1 = k^2 R_1 \quad V'_1 = k V_1 \quad I'_1 = \frac{I_1}{k}$$

• Paramètres secondaire au primaire

$R_p = R_1 + \frac{R_2}{k^2}$  La résistance du transformateur ramenée au primaire

$X_p = X_1 + \frac{X_2}{k^2}$  La réactance de fuites magnétiques ramenée au primaire.

Le schéma équivalent dans le cas des paramètres secondaires ramenés au primaire :

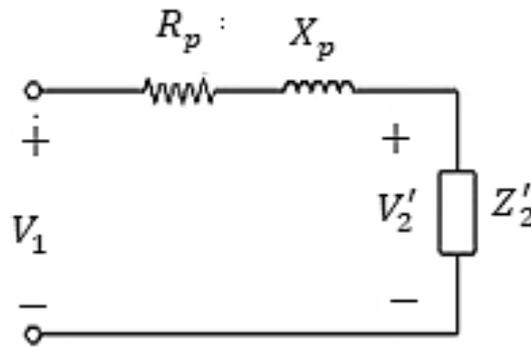


De ce circuit, on définit :

$$X'_2 = \frac{X_2}{k^2} \quad R'_2 = \frac{R_2}{k^2} \quad V'_2 = \frac{V_2}{k} \quad I'_2 = k I_2$$

Dans un transformateur typique, le courant  $I_0$  est *seulement* 2 à 4% de la valeur du courant  $I_1$ . Pour simplifier l'analyse, on peut donc négliger le courant  $I_0$ . On va donc supposer que le noyau a des pertes fer négligeables et une perméabilité élevée.

On obtient alors le circuit suivant :



Circuit équivalent simplifié du transformateur.

$$X_p = X_1 + \frac{X_2}{k^2}, \quad R_p = R_1 + \frac{R_2}{k^2}, \quad Z'_2 = \frac{Z_2}{k^2}, \quad V'_2 = \frac{V_2}{k}$$

On obtient alors les relations suivantes :

$$V_1 = R_p I_1 + jX_p I_1 + V'_2$$

$$I'_2 = I_1$$

et ainsi un diagramme vectoriel simplifié.

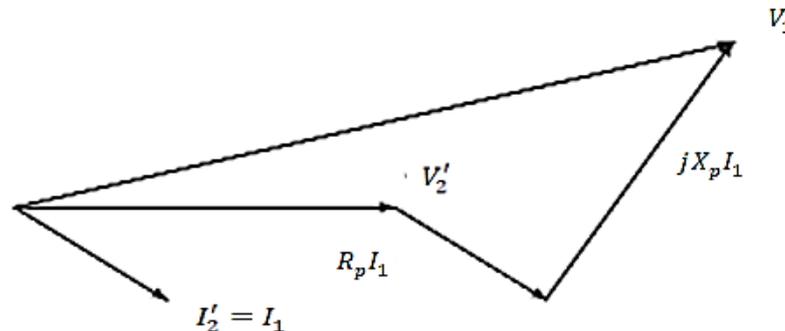


Diagramme vectoriel des tensions et courants du transformateur simplifié.

## V.5 Autres Transformateurs

### V.5.1 Transformateur d'isolement

Un transformateur crée une isolation galvanique entre son primaire et son secondaire, cette propriété est utilisée tout spécialement dans les transformateurs d'isolement. Ils servent à assurer la sécurité d'une installation en protégeant des électrocutions par exemple. La séparation galvanique permet aussi d'éliminer une partie du bruit électrique, ce qui est utile pour certains appareils électroniques sensibles. Ces transformateurs ont presque le même nombre de spires au primaire et au secondaire :

Ils sont, par exemple, largement utilisés dans les blocs opératoires : chaque salle du bloc est équipée de son propre transformateur d'isolement, pour éviter qu'un défaut dans un bloc n'affecte les autres.

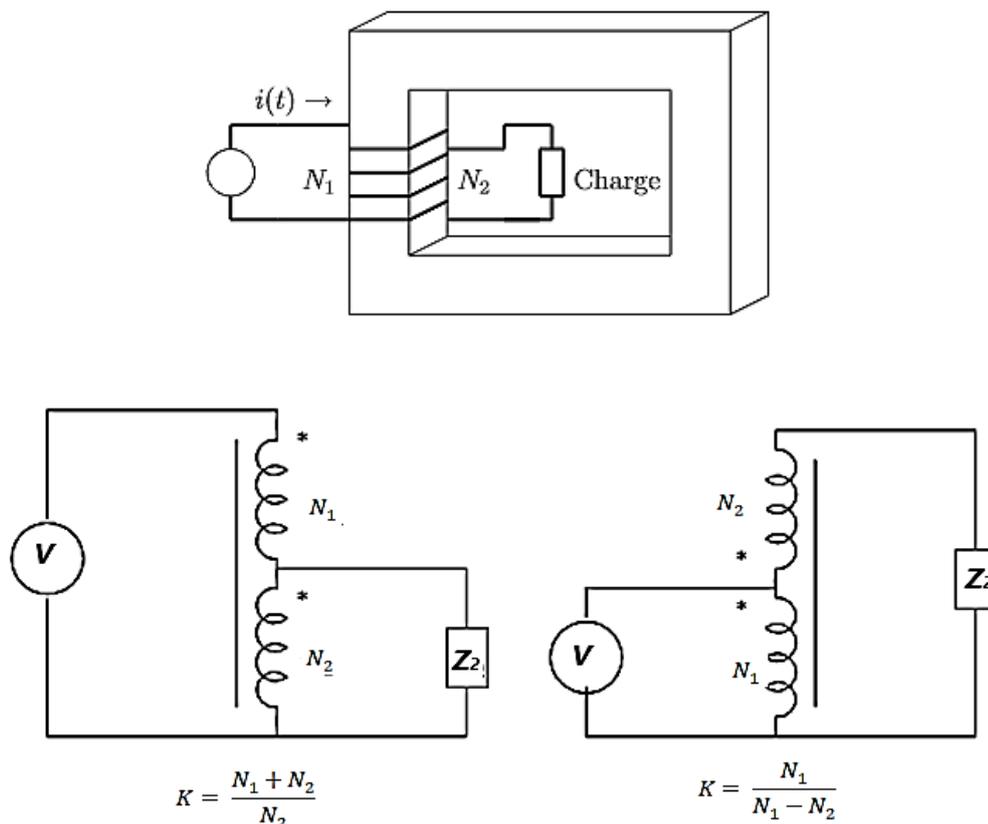
Un autre intérêt est de pouvoir changer de régime de neutre (cas d'utilisation de matériel informatique et/ou d'équipements électroniques sensibles dans une installation IT).

### V.5.2 Transformateur à impulsion

Ce type de transformateur est utilisé pour la commande des thyristors, triacs et des transistors. Il présente, par rapport à l'opto-coupleur, les avantages suivants : fonctionnement possible à fréquence élevée, simplification du montage, possibilité de fournir un courant important, bonne tenue en tension.

### V.5.3 Autotransformateur

L'autotransformateur est constitué d'un enroulement primaire et secondaire bobinés sur le même circuit magnétique. En d'autres termes, c'est un transformateur à un enroulement. Les deux enroulements ont une partie commune, et il n'y a pas d'isolation galvanique entre les deux enroulements.

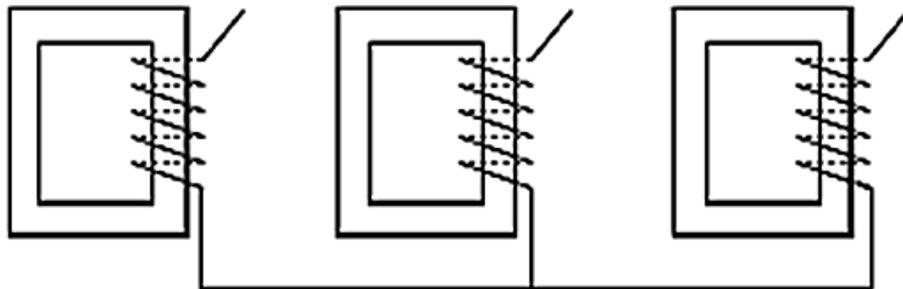


Un auto-transformateur est utilisé pour :  $K = \frac{N_1 + N_2}{N_2}$   $K = \frac{N_1}{N_1 - N_2}$

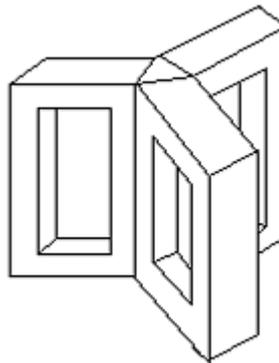
- Démarrer les moteurs à induction et les moteurs synchrones afin de fournir jusqu'à 50 à 60% de la tension totale au stator du moteur lors du démarrage.
- Donner un petit coup de pouce à la distribution d'un câble, en compensant les chutes de tension.
- Il est également utilisé comme régulateur de tension.

### V.5.4 transformateurs triphasés

Un transformateur triphasé peut être constitué de trois transformateurs monophasés. La figure représente les enroulements primaires couplés en étoile. Cette solution entraîne un encombrement important et une sous-utilisation du fer mais elle est parfois utilisée.



- Il est possible de réaliser le circuit magnétique ci-contre (les enroulements primaire et secondaire sont placés sur les colonnes verticales périphériques) : Chaque enroulement primaire comporte  $n_1$  spires, le secondaire  $n_2$  spires. Le circuit magnétique de chaque enroulement se referme dans la colonne centrale, les flux sont indépendants.



$$V_1 = jn_1\omega\Phi_1, \quad V_2 = jn_2\omega\Phi_2, \quad V_3 = jn_3\omega\Phi_3$$

D'où le flux dans la colonne centrale :  $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = \frac{1}{jn_1\omega} (V_1 + V_2 + V_3)$

Si  $V_1 + V_2 + V_3 = 0$ , il est possible de supprimer la colonne centrale. Ce type de transformateur se rencontre très rarement à cause de la complexité de la construction par rapport au bénéfice obtenu.

Pour simplifier la construction, on réalise des circuits magnétiques coplanaires (un seul enroulement par colonne est représenté sur le schéma ci-contre) : la somme des flux dans chacune des colonnes verticales est nulle ( $\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$ ) si les fuites de flux sont négligées. Le circuit magnétique est à flux liés : les différents flux ne peuvent pas s'établir indépendamment les uns des autres.