

# Sommaire

<b>Chapitre 1 ■ Le transformateur monophasé parfait</b> .....	5
<i>Méthodes : l'essentiel ; mise en œuvre</i> .....	19
<i>Exercices : énoncés, indications, solutions</i> .....	22
<b>Chapitre 2 ■ Étude du ferromagnétisme et de ses applications</b> .....	47
<i>Méthodes : l'essentiel ; mise en œuvre</i> .....	82
<i>Exercices : énoncés, indications, solutions</i> .....	85
<b>Chapitre 3 ■ La machine à courant continu</b> .....	121
<i>Méthodes : l'essentiel ; mise en œuvre</i> .....	140
<i>Exercices : énoncés, indications, solutions</i> .....	148
<b>Chapitre 4 ■ Machines alternatives</b> .....	177
<i>Méthodes : l'essentiel ; mise en œuvre</i> .....	194
<i>Exercices : énoncés, indications, solutions</i> .....	197
<b>Chapitre 5 ■ Introduction à la conversion électronique de la puissance</b> .....	221
<i>Méthodes : l'essentiel ; mise en œuvre</i> .....	235
<i>Exercices : énoncés, indications, solutions</i> .....	239
<b>Chapitre 6 ■ Transfert de puissance en courant continu</b> .....	255
<i>Méthodes : l'essentiel ; mise en œuvre</i> .....	269
<i>Exercices : énoncés, indications, solutions</i> .....	275
<b>Index</b> .....	318

# *Le transformateur monophasé parfait*

## Introduction

Le transformateur est un dispositif simple d'usage et très répandu dans la vie de tous les jours. En effet, bon nombre d'appareils domestiques sont reliés au réseau électrique par son intermédiaire. C'est un composant indispensable dans le transport de l'énergie électrique alternative depuis la centrale de production jusqu'aux utilisateurs. Il permet également d'assurer la protection des biens et des personnes.

Son étude est fondamentale pour appréhender le principe de convertisseur en électrotechnique, en particulier, les convertisseurs tournants que sont les machines alternatives. À titre d'exemple, la modélisation du transformateur s'apparente, entre autres, à celle des machines asynchrones.

### Plan du chapitre 1

<b>A. Rôle du transformateur dans la distribution électrique – Exemple</b> .....	6
1. Production et transport de l'énergie électrique .....	6
2. Exemple : transformateur à usage didactique .....	6
<b>B. Constitution et description du transformateur</b> .....	7
1. Constitution .....	7
2. Description – plaque signalétique .....	7
<b>C. Étude d'un circuit magnétique torique</b> .....	8
1. Conventions d'orientation .....	8
2. Éléments de magnétisme .....	11
3. Cas du circuit magnétique torique .....	12
<b>D. Modélisation du transformateur monophasé parfait</b> .....	13
1. Hypothèses du transformateur parfait .....	13
2. Relations entre courants primaire et secondaire .....	14
3. Relations entre tensions primaire et secondaire .....	14
4. Bilan des puissances .....	16
5. Transferts d'impédance .....	16
6. Intérêt et limite du modèle du transformateur parfait .....	17
<b>Méthodes</b>	
L'essentiel ; mise en œuvre .....	19
<b>Énoncés des exercices</b> .....	22
<b>Solutions des exercices</b> .....	27

# A. Rôle du transformateur dans la distribution électrique – Exemple

## A.1. Production et transport de l'énergie électrique

Quatre types d'énergie peuvent être transformés en énergie électrique :

- l'énergie hydraulique ;
- l'énergie thermique du charbon ;
- l'énergie thermique du fuel ;
- l'énergie thermique dégagée lors de réactions nucléaires.

La puissance maximale produite dans une centrale est comprise entre une centaine et quelques milliers<sup>1</sup> de MW ( $1\text{MW} = 10^6\text{W}$ ). Cependant, compte tenu des grandes distances à parcourir depuis les centrales vers les particuliers (mais aussi vers d'autres pays), il a été démontré que le transport de l'énergie électrique doit se faire sous haute ou très haute tension.

Il faut donc élever le niveau de tension à la sortie des centrales puis l'abaisser pour la distribuer aux utilisateurs. En réalité, plusieurs abaissements successifs sont réalisés afin de permettre la distribution de différents niveaux de tension. C'est précisément dans ces variations de niveau de tension qu'intervient le rôle du transformateur.

Signalons enfin que la tension du réseau électrique en France est sinusoïdale avec une fréquence de 50 Hz.

1. Par exemple, la centrale nucléaire de Chooz B (Ardennes) possède deux réacteurs de 1450 MW.

2. Statique par opposition aux convertisseurs électromécaniques qui convertissent de l'énergie en mettant en œuvre un mouvement mécanique.

Le **transformateur** est un convertisseur statique<sup>2</sup> qui permet de modifier en sortie la valeur efficace de la tension sinusoïdale appliquée à son entrée sans en modifier la fréquence.

## A.2. Exemple : transformateur à usage didactique

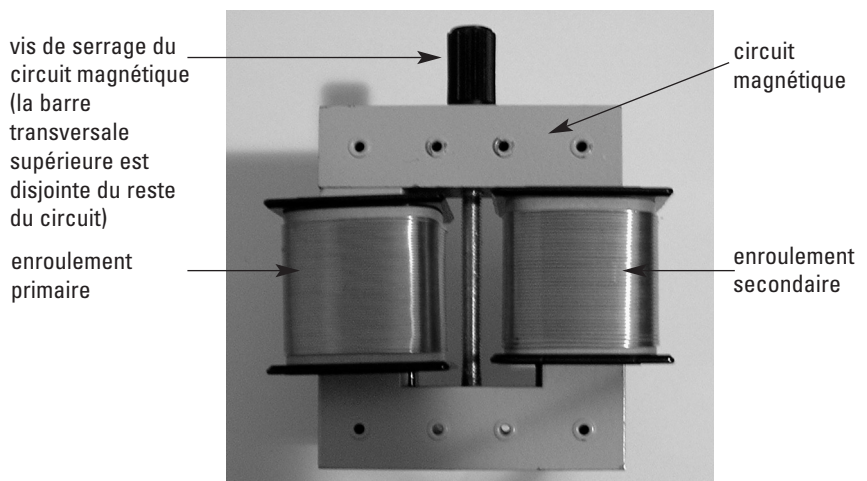


Fig. 1 – Transformateur monophasé de tension.

Dans la réalité industrielle, les enroulements sont disposés de manière concentrique afin d'améliorer le couplage magnétique entre les deux enroulements.

## B. Constitution et description du transformateur

### B.1. Constitution

1. Ou plus simplement, *circuit magnétique*.

2. On parle alors d'*isolation galvanique* (les références ou « masses » sont indépendantes).

3. Ces pertes sont dites « pertes fer » (voir le TP cours consacré à l'étude du transformateur).

Le transformateur monophasé est constitué d'un **matériau ferromagnétique**<sup>1</sup> sur lequel sont bobinés **deux enroulements électriques indépendants**<sup>2</sup> (i.e. sans aucune connexion électrique) comme le montre la [figure 1](#).

Le rôle du circuit ferromagnétique est d'assurer une canalisation optimale des lignes de champ magnétique afin d'obtenir un couplage maximal entre les deux enroulements. Le choix du matériau ferromagnétique repose essentiellement sur les contraintes de coût, d'encombrement et de refroidissement. Actuellement, il existe aussi des matériaux capables de réduire les pertes<sup>3</sup> associées à l'existence d'un champ électromagnétique (tôles à grains orientés en dessous de quelques kilohertz et ferrites ou amorphes à plus haute fréquence pour les transformateurs d'impulsions par exemple).

Les deux enroulements électriques sont réalisés à l'aide de conducteurs en cuivre recouverts d'un vernis isolant. Généralement, ils sont disposés de manière concentrique afin de renforcer leur couplage électromagnétique.

### B.2. Description – plaque signalétique

#### Définition 1

L'enroulement qui est relié à la source d'alimentation du transformateur est appelé enroulement **primaire**. L'autre enroulement, relié à la charge<sup>4</sup> du transformateur, est appelé enroulement **secondaire**.

4. La *charge* est située en *aval* du transformateur tandis que la *source* est située en *amont* du transformateur.

Par la suite, les grandeurs primaires seront indicées par le chiffre 1 et les grandeurs secondaires par le chiffre 2. Par exemple, la tension primaire est notée  $v_1$ , la tension secondaire est notée  $v_2$ .

Lorsque la tension au secondaire  $v_2$  est plus élevée que celle du primaire  $v_1$ , on parle de transformateur **élevateur de tension** (exemple: à la sortie de la centrale de production). Dans le cas contraire il s'agit d'un transformateur **abaisseur de tension** (exemple: transformateur sur poteau électrique à proximité d'un secteur d'habitation). Il existe des transformateurs où la tension délivrée à la charge est identique à celle prélevée à la source: on réalise une isolation galvanique entre la source et le récepteur d'énergie et on parle de **transformateur d'isolement**.

5. Ou à une charge d'impédance suffisamment élevée pour considérer cette affirmation légitime.

6. Ceci n'est pas le cas pour certains types de transformateur comme le transformateur d'impulsions qui au contraire fonctionnent dans une large gamme de fréquences.

7. Disons pour être précis qu'une grandeur  *nominale*  correspond aux conditions d'utilisation  *normale* . Ces valeurs peuvent être dépassées dans une certaine limite, dans certains cas mais pour un temps limité.

Dans le cas particulier où le secondaire n'est connecté à aucune<sup>5</sup> charge, le transformateur est dit **à vide**. Ce cas particulier de fonctionnement est important en pratique comme nous le verrons en TP cours.

Le transformateur industriel est conçu pour une<sup>6</sup> **fréquence d'utilisation** bien définie (50 Hz pour le réseau E.D.F. par exemple) car la fréquence est un paramètre dont dépendent entre autres les pertes ferromagnétiques (voir TP cours).

Un transformateur est dimensionné par son constructeur qui définit les valeurs que doivent prendre les intensités des courants, les tensions, etc., et ce afin de décrire l'utilisation qui en est prévue<sup>7</sup>. Ces valeurs sont dites **nominales**.

Pour distinguer une grandeur nominale, nous ajouterons la lettre n en indice. Par exemple, l'intensité efficace du courant secondaire nominal est notée  $I_{2n}$ .

### Définition 2

La **puissance apparente nominale**, notée  $S_n$ , est le produit de la valeur efficace de la tension secondaire à vide  $V_{20}$  par la valeur efficace du courant secondaire nominal  $I_{2n}$  :

$$S_n = V_{20} I_{2n}$$

$V_{20}$  tension secondaire (V)  
 $I_{2n}$  intensité secondaire (A)  
 $S_n$  puissance apparente nominale (VA)

Toutes ces données nominales sont accessibles à partir de la *plaque signalétique* du transformateur dont nous donnons un exemple en [figure 2](#).



Fig. 2 – Plaque signalétique d'un transformateur abaisseur de tension.

## C. Étude d'un circuit magnétique torique

Dans ce paragraphe, nous définissons les règles d'usage nécessaires à l'étude du transformateur et plus particulièrement dans le cas où le circuit magnétique a la forme d'un tore<sup>1</sup>.

1. Nous admettrons la généralisation des résultats de ce paragraphe à un circuit magnétique de forme quelconque et fermé sur lui-même.

### C.1. Conventions d'orientation

Considérons un transformateur dont le noyau magnétique est de forme torique et de section droite  $S$  circulaire; notons  $\ell$  la longueur de la ligne de champ moyenne. L'enroulement primaire est constitué de  $n_1$  spires bobinées sur le noyau et l'enroulement secondaire en comporte  $n_2$  :

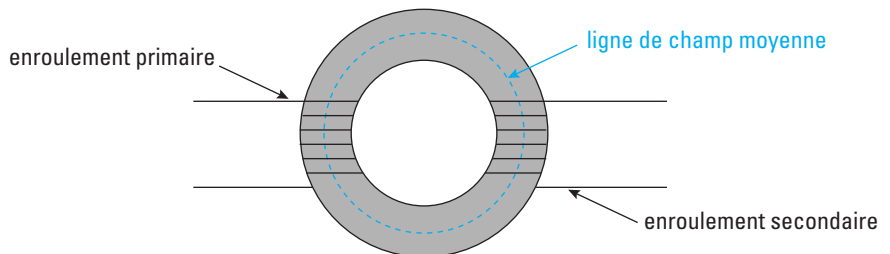


Fig. 3 – Transformateur monophasé à circuit magnétique torique.