



REPOBLIKAN'I MADAGASIKARA  
Fitiavana-Tanindrazana-Fandrosoana



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE D'ANTSIRANANA

ECOLE NORMALE SUPERIEURE POUR L'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE

DEPARTEMENT : **GENIE ELECTRIQUE**

---

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE D'OBTENTION DE C.A.P.E.N**

---

# **DIDACTICIEL DE SIMULATION D'UN TRANSFORMATEUR**

**Par :**

MANDIMBISON Hasina Jonathan

**Encadreurs :**

SABATA Maurice  
RANJORO Justin  
RANDRIANARISOA Émile

**Promotion :**

**HENJANA**

**Humbles Etudiants Normalien Jeunes Actifs et Novateur pour l'Avenir  
-Février 2011-**

Année Universitaire 2009-2010

## **REMERCIEMENTS**

Je rends honneur et gloire à Dieu tout puissant de m'avoir béni, donné force, intelligence et santé pendant ces cinq années d'études à l'Ecole Normale Supérieure pour l'Enseignement Technique, et d'être son humble serviteur lors de l'accomplissement de ce travail de mémoire.

L'auteur tient à remercier du fond du cœur toutes les personnes qui, par leurs responsabilités, aides et compréhensions ont permis la réalisation de ce travail. J'éprouve de la gratitude de leurs engagements moral, physique et spirituel.

Je mentionne tout particulièrement Messieurs SABATA Maurice, RANJORO Justin, et RANDRIANARISOA Emile, responsables de ce sujet, qui m'ont guidé dans ce travail. J'apprécie mutuellement leurs compétences, leurs immenses qualités d'organisation. Ils n'ont pas ménagé leurs efforts pour assurer mon encadrement.

Mes remerciements s'expriment également à Madame le Président de jury et à tous les membres de jury qui ont pris leurs temps pour porter jugement à ce présent travail.

Je partage humblement ma joie avec ma grande famille qui m'a donné entièrement satisfaction. Permettez-moi de citer mes parents, mon frère et mes sœurs qui m'ont beaucoup soutenu moralement et financièrement ; sans leurs abnégations de tous les instants, les bons comme les mauvais, il était si précaire pour moi d'arriver à ce stade.

Je leur doit toutes mes salutations.

En sommes, mes plus vifs remerciements vont à tout ceux qui, de près ou loin ont contribué à la réalisation de ce présent travail.

Merci à tous !

MANDIMBISON Hasina Jonathan

**MEMOIRE (1PETGE5)**

**DIDACTICIEL DE SIMULATION D'UN TRANSFORMATEUR**

Actuellement l'informatique occupe une place importante dans l'enseignement. En effet, des logiciels ont été développés pour aider l'élève à assimiler le cours.

Dans le cadre de ce travail de mémoire, on propose de réaliser un logiciel d'enseignement assisté par ordinateur pour l'analyse du fonctionnement d'un transformateur (monophasé et triphasé). En effet, selon les caractéristiques du transformateur consignées sur sa plaque signalétique ou sa fiche technique, on peut établir le modèle du transformateur. Puis, selon la charge qu'il alimente, les grandeurs telles que les courants, les pertes de puissances, les chutes de tensions etc.... sont calculées et affichées. L'analyse de ces grandeurs pour différents types de charge permettra à l'élève de comprendre le transformateur et son comportement.

**OBJECTIF :**

Développement d'un logiciel didactique permettant de simuler un transformateur

**TRAVAUX DEMANDES :**

- Recherche bibliographique
- Etudes théoriques
- Choix du langage de programmation et programmation
- Validation des résultats
- Manuel d'utilisation du didacticiel
- Applications
- Conclusion

**Encadreurs :** SABATA Maurice  
RANJORO Justin  
RANDRIANARISOA Emile

## **INTRODUCTION GENERALE**

Actuellement l'informatique occupe une place importante dans l'enseignement. En effet, des logiciels ont été développés pour aider l'élève à assimiler le cours.

Dans le cadre de ce travail de mémoire, on propose de réaliser un logiciel d'enseignement assisté par ordinateur pour l'analyse du fonctionnement d'un transformateur (monophasé et triphasé). En effet, selon les caractéristiques du transformateur consignées sur sa plaque signalétique ou sa fiche technique, on peut établir le modèle du transformateur. Puis, selon la charge qu'il alimente, les grandeurs telles que les courants, les pertes de puissances, les chutes de tensions etc.... sont calculées et affichées. L'analyse de ces grandeurs pour différents types de charge permettra à l'élève de comprendre le transformateur et son comportement.

Ainsi nous allons concevoir un logiciel didactique de simulation d'un transformateur électrique. A cette fin, notre rapport comporte trois grandes parties.

Dans la première partie : nous parlons de généralités sur les transformateurs, de ces éléments constitutifs ainsi que les théories de son fonctionnement. Cette tranche est composée de trois rubriques telles que les circuits magnétiques de transformateur

Dans la deuxième partie, nous procéderons à la conception du didacticiel, le choix du langage de programmation approprié à cet effet

La quatrième partie va aborder la présentation du logiciel didactique. Puis, dans la cinquième et dernière partie, nous allons effectuer des applications pour valider le logiciel et nous interprétons les résultats.

## **Première partie : ETUDE THEORIQUE DU TRANSFORMATEUR**

## **1. Historique**

Le transformateur est un composant fondamental en électrotechnique, son étude constitue l'un des piliers de cette discipline.

Les principes du transformateur ont été établis en 1831 par Michael Faraday, mais celui-ci ne s'en servit que pour démontrer le principe de l'induction électromagnétique et n'en prévint les applications pratiques.

Le premier transformateur employé couramment était la bobine d'induction, inventé par l'ecclésiastique irlandais Nicholas Callan en 1836. Il était l'un des premiers pour comprendre le principe plus que de bobiner un enroulement de transformateur.

Les bobines d'induction ont évolué des efforts de scientifiques d'obtenir des tensions plus élevées des batteries. Entre 1830 et 1870, les efforts de construire de meilleures bobines d'induction se poursuivaient, la plupart du temps par épreuve et erreur, a lentement indiqué les principes de base de l'opération de transformateur. Les conceptions efficaces n'apparaîtraient pas que jusqu'à 1880 mais dans moins qu'une décennie, le transformateur était instrumental pendant la « Guerre des courants » en voyant le courant alternatif qui triomphe les systèmes au-dessus de leur courant continu, une position en laquelle ils sont restés dominants.

En 1876, l'ingénieur russe Pavel Yablochkov a inventé un système d'éclairage basé sur un ensemble de bobines d'induction, où des enroulements primaires ont été reliés à une source de courant alternatif et d'enroulements secondaires pourraient être reliés à plusieurs « bougies électriques ». Le brevet a réclamé, le système a pu « fournir l'approvisionnement séparé à plusieurs montages d'éclairage avec différentes intensités lumineuses d'une source simple d'énergie électrique ». Évidemment, la bobine d'induction dans ce système actionné est comme transformateur.

Lucien Gaulard et John Dixon Gibbs, qui a exhibé un dispositif avec un noyau de fer ouvert appelé « un générateur secondaire » à Londres en 1882 et puis a vendu la première fois l'idée à la compagnie américaine Westinghouse.

En 1883, Lucien Gaulard et John Dixon Gibbs réussissent à transmettre pour la première fois, sur une distance de 40 km, du courant alternatif sous une tension de 2 000 volts à l'aide de transformateurs avec un noyau en forme de barres.

Lucien Gaulard, le jeune électricien français, présente à la Société Française des électricités en 1884, un « générateur secondaire », dénommé depuis transformateur.

En 1884, Lucien Gaulard met en service une liaison bouclée de démonstration (133 Hz) alimentée par du courant alternatif sous 2 000 volts et allant de Turin à Lanzo et retour (80 km). On finit alors par admettre l'intérêt du transformateur qui permet d'élever la tension délivrée par un alternateur et facilite ainsi le transport de l'énergie électrique par des lignes à haute tension. La reconnaissance de Gaulard interviendra trop tardivement.

Entre-temps, des brevets ont été pris aussi par d'autres. Le premier brevet de Gaulard en 1882 n'a même pas été délivré en son temps, sous prétexte que l'inventeur prétendait pouvoir faire « quelque chose de rien » ! Gaulard attaque, perd ses procès, est ruiné, et finit ses jours dans un asile d'aliénés. Le transformateur de Gaulard de 1886 n'a pas grand-chose à envier aux transformateurs actuels, son circuit magnétique fermé (le prototype de 1884 comportait un circuit magnétique ouvert, d'où un bien médiocre rendement) est constitué d'une multitude de fils de fer annonçant le circuit feuilleté à tôles isolées.

Ainsi, en 1885, les Hongrois Károly Zipernowsky, Miksa Déry et Otto Titus Bláthy mettaient au point un transformateur avec un noyau fermé, basé sur la conception par Gaulard et Gibbs, et commercialisé dans le monde entier par la firme Ganz à Budapest et aux États-Unis.

Mikhail Dolivo-Dobrovolsky, un ingénieur russe a développé le premier transformateur triphasé en 1889.

En 1891 Nikola Tesla a inventé l'enroulement portant son nom « enroulement de Tesla », un transformateur résonnant à air-creusé et duel-accordé pour produire des tensions très élevées à la fréquence.

Son essor fut immédiat, les puissances réalisées augmentèrent très rapidement, quelques 100kVA en 1900 et quelques MVA en 1910.

Actuellement, grâce à l'évolution de la technologie, on gagne sur le poids de fer utilisé et le niveau de pertes est moins important. En 2008, le Polytransformer d'ABB à Córdoba en Espagne peut atteindre une puissance exceptionnelle de 830 MVA.

## **2. Généralités**

La distribution de l'énergie électrique qu'elle soit domestique ou industrielle, se fait généralement sous tension faible ou moyenne (220V, 380V ou 25kV) pour des raisons de commodité d'emploi (puissance utile...) et de sécurité. En revanche, le transport se fait sous tension élevée pour diminuer la valeur du courant de lignes et donc les pertes joules dans les conducteurs. Pour cela, il est nécessaire, à l'entrée d'une usine ou d'un bâtiment habitable, de disposer d'une machine permettant d'adapter le niveau de la tension de distribution aux dispositifs qui vont utiliser l'énergie. C'est le rôle des transformateurs de distribution. Ils sont conçus pour fonctionner à 50Hz et les matériaux utilisés doivent avoir des pertes fer convenables à cette fréquence.

Il existe des transformateurs particuliers conçus pour des applications autres que la distribution. On peut citer l'autotransformateur qui permet d'obtenir en sortie un niveau de tensions réglables ou les transformateurs assurant une isolation galvanique dans les dispositifs d'électronique de puissance (transformateur d'alimentation à découpage) et dans le régime de neutre.

Dans tous les cas, le transformateur est une machine statique à induction électromagnétique, constitué d'un noyau appelé circuit magnétique et aux moins deux enroulements, qui permet de modifier le niveau de tension du signal alternatif d'entrée sans modifier sa fréquence. Si la tension appliquée à l'entrée est plus basse que celle récupérée à la sortie, le transformateur fonctionne en élévateur, dans le cas inverse en abaisseur. Il faut noter que le transformateur est un dispositif inductif et que par conséquent, il filtre la composante continue du signal d'entrée.

Dans la suite, nous ne nous intéresserons qu'au transformateur de distribution, conçu pour fonctionner à fréquence industrielle (50 ou 60Hz).

## Chapitre 1 : LES CIRCUITS MAGNETIQUES DES TRANSFORMATEURS

### 1.1 Introduction

La conversion d'énergie électrique en énergie mécanique ou en énergie électrique de tension différente recourt à deux types de phénomènes :

- les phénomènes électriques associés au courant ;
- les phénomènes magnétiques associés au flux magnétique.

De ce fait, de nombreux dispositifs font alors appel à des matériaux magnétiques doux ferromagnétiques ou ferromagnétiques tels que les transformateurs, les machines électriques tournantes, etc....

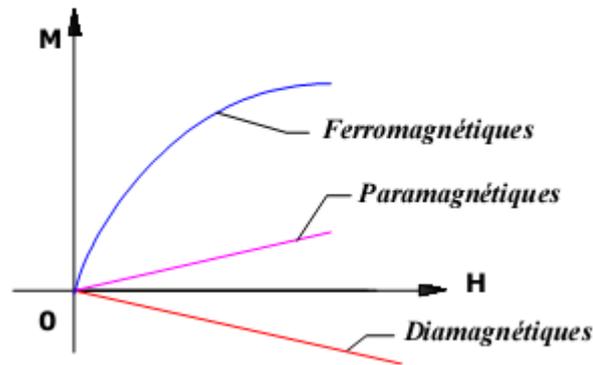
Dans la suite, nous allons expliquer l'intérêt de ces matériaux dans des systèmes électriques.

### 1.2 Classification des substances

Toutes les substances sur la terre ont des propriétés magnétiques, c'est-à-dire peuvent s'aimanter. Toutefois les propriétés magnétiques ne sont pas les mêmes pour toutes les substances. C'est pour cette raison qu'on peut les classer en trois catégories principales à savoir :

- **les substances non ferromagnétiques :** dans lesquelles l'aimantation  $M$  est proportionnelle à l'induction  $B$  et au champ  $H$ . Autrement dit ayant une susceptibilité magnétique  $\chi$  (une perméabilité constante). Toutefois les propriétés magnétiques de ces substances sont tellement faibles ( $\chi < 10^{-3}$ ), dans la technique, on les considère comme étant non magnétiques. Les substances de cette catégorie se divisent en deux groupes :
  - les paramagnétiques : ( $\chi > 0$ )
  - les diamagnétiques : ( $\chi < 0$ )
- **les substances ferromagnétiques :** dans ces derniers l'aimantation  $M$  n'est plus liée fonctionnellement à  $H$ , elle dépend de toutes les valeurs antérieures prises par  $H$  donc  $\chi$  est variable et d'autre part, peut prendre des valeurs positives trop grandes jusqu'à  $10^7$ , ainsi les ferromagnétiques ont des propriétés magnétiques très marquées. Dans la pratique, on les considère comme étant les seules substances magnétiques.

La figure ci-dessous résume le comportement des 3 catégories de matériaux :



**Figure 1.1** : Illustration des comportements magnétiques des substances

$M$  est alors appelée aimantation du matériau et est proportionnelle au champ d'excitation et peut se mettre sous la forme :

$$M = \chi \cdot H \quad (1.1)$$

où  $\chi$  est la susceptibilité magnétique du matériau.

### 1.3 Nécessité du noyau magnétique

L'énergie stockée peut être allée jusqu'à 20 fois plus grande dans un bobinage réalisé sur un noyau magnétique que dans un bobinage réalisé sur un matériau amagnétique. Cette énergie dépend de l'induction  $B$ .

Dans le cas d'un matériau non magnétique, l'induction est peu différente de  $\mu_0 H$ , où  $\mu_0$  est la perméabilité du vide. Elle est de l'ordre de 0,1T.

Par contre, dans le cas d'un matériau magnétique, l'induction s'exprime par la relation :

$$B = \mu_0 \cdot H + M \quad (1.2)$$

où  $M$  est l'aimantation créée par la structure microscopique du matériau.  $B$  peut alors atteindre des valeurs de l'ordre de 2T.

### 1.4 Rôle et constitution

Le circuit magnétique d'un transformateur permet de canaliser le flux produit par l'enroulement primaire. Pour réduire l'échauffement par courant de Foucault, il est formé de

tôles parallèles à la direction du flux et isolées les unes des autres (circuit magnétique feuilleté). Les tôles sont laminées à froid (tôles à cristaux orientés) et présentent une direction privilégiée du flux, dans le sens du laminage.

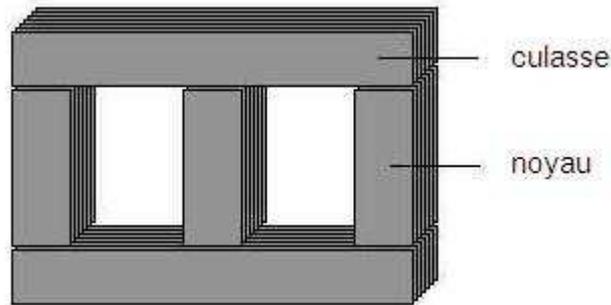


Figure 1.2 : Constitution d'un circuit magnétique d'un transformateur

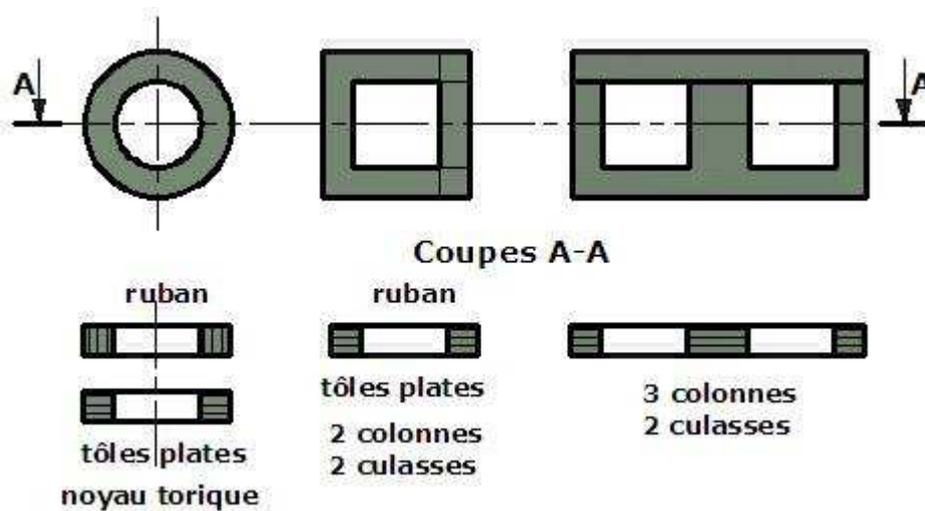


Figure 1.3 : Circuits magnétiques pour transformateurs monophasés

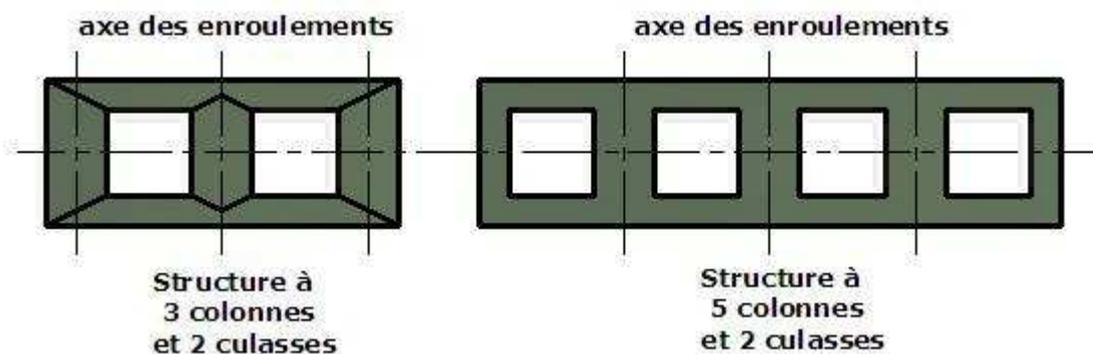
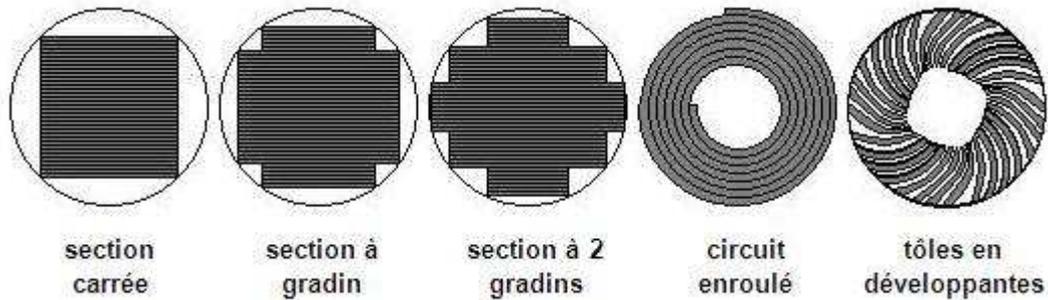


Figure 1.4 : Circuits magnétiques pour transformateurs triphasés

## 1.5 Le noyau

Le noyau (colonne) porte les bobinages qui sont circulaires de façon à mieux résister aux efforts électrodynamiques. La section du noyau doit donc s'inscrire dans un cercle, l'encombrement minimal étant obtenu pour une section circulaire.



**Figure 1.5 :** Différentes formes de noyaux

L'exemple suivant nous montre un noyau dont la section est en forme de gradin



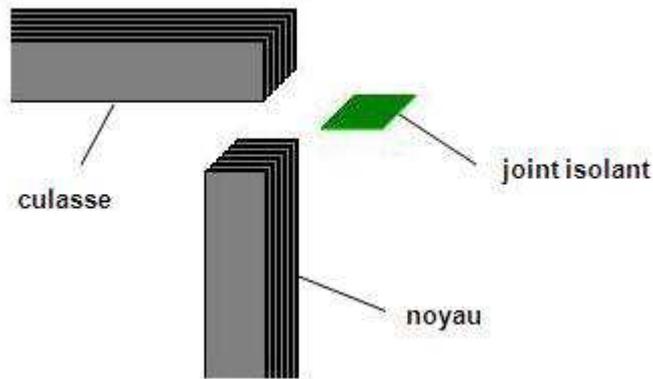
**Figure 1.6 :** Noyau à section en forme de gradin d'un transformateur de puissance

La culasse ne porte pas de bobines. Sa section est généralement plus simple que celle du noyau.

## 1.6 Les joints

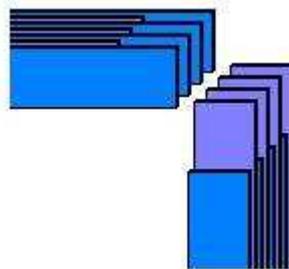
Le problème est de raccorder les noyaux sur les culasses, au moyen d'un joint aussi simple que possible, avec des pertes minimales.

Le joint plan facilite le montage et le démontage des bobinages. Les parties des noyaux et culasse à assembler sont usinées. Un joint isolant est nécessaire pour éviter les courts-circuits magnétiques.



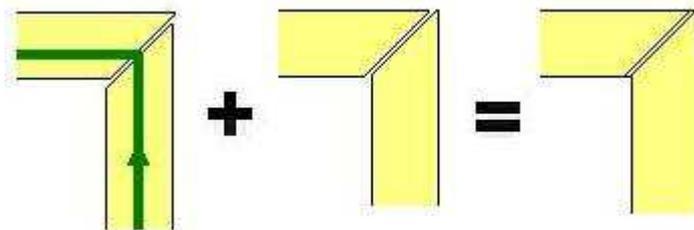
**Figure 1.7 :** Raccordement du noyau sur la culasse par joint plan

Le joint enchevêtré est la solution classique. Le montage est fait tôle par tôle. Les qualités magnétiques du joint sont meilleures.



**Figure 1.8 :** Assemblage du noyau sur la culasse par joint enchevêtré

La qualité du joint peut être encore améliorée par les coupes obliques à 45° des permettant une meilleure circulation du flux dans le sens du laminage.



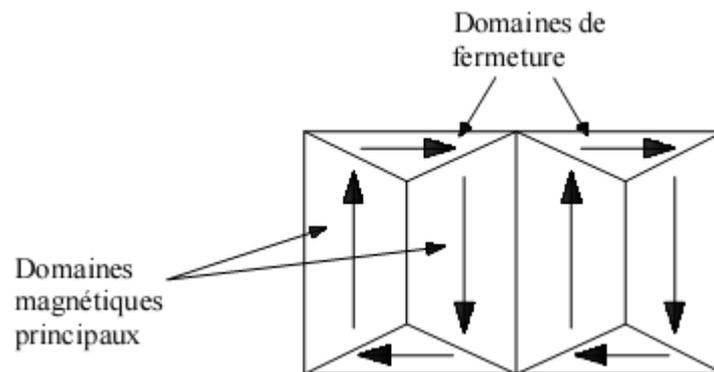
**Figure 1.9 :** Coupe oblique du joint

## 1.7 Le phénomène d'aimantation d'un matériau ferromagnétique.

### ➤ Structure d'un matériau ferromagnétique (domaine de Weiss)

Considérons un matériau ferromagnétique. On observe des zones dans lesquelles les moments magnétiques sont tous orientés dans le même sens. Ces zones sont appelées domaines magnétiques. En augmentant la surface observée, on constate qu'il existe plusieurs types de domaines. On distingue les domaines principaux, pour lesquels l'aimantation est

orientée successivement dans un sens puis dans l'autre. Les domaines de fermeture assurent le bouclage du flux à l'intérieur du matériau (pas de flux rayonné vers l'extérieur). Pour simplifier, en observant localement, on peut représenter ces domaines de la façon suivante :



**Figure 1.10 :** Représentation des domaines magnétiques

Cette structure permet d'expliquer pourquoi on n'observe aucun champ extérieur en l'absence d'excitation. Elle peut être observée par effet Kerr (on envoie une onde électromagnétique polarisée sur le matériau et on observe la modification différente de polarisation de l'onde réfléchié suivant le domaine sur lequel la réflexion a eu lieu).

**Remarque :**

La taille des domaines dépend du matériau étudié et leur structure n'est pas aussi régulière dans la réalité que sur la figure précédente.

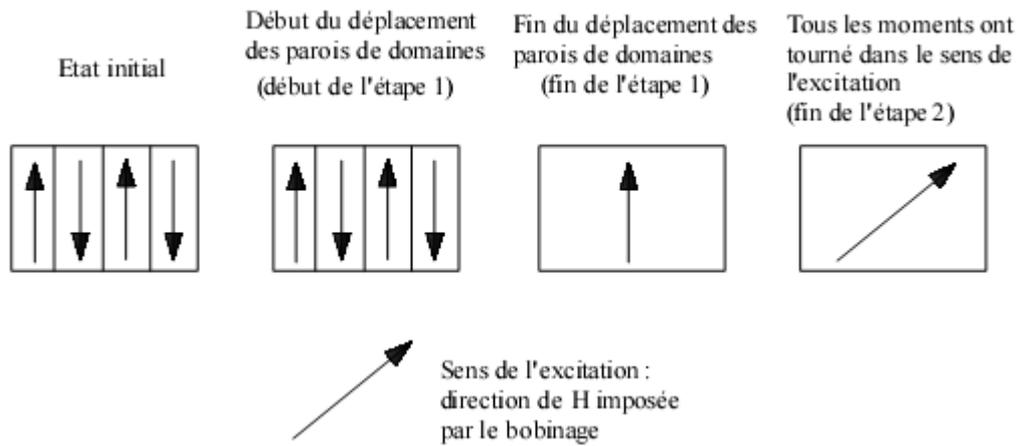
Dans le cas d'un aimant, le matériau, en raison de ses irrégularités de structure, est figé dans un état monodomaine, d'où un champ observable en absence d'excitation.

### 1.8 Le processus d'aimantation

Si on excite le matériau par l'intermédiaire d'un bobinage appliquant un champ  $H$ , le matériau évolue de la façon suivante : (ici, on n'a pas représenté les domaines de fermeture)

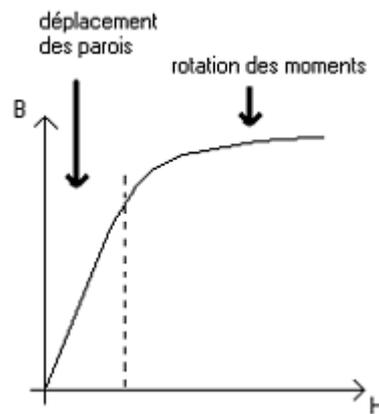
**Etape1:** sans rotations des moments, les domaines pour lesquels l'orientation de l'excitation est la plus favorable sont privilégiés et se développent au détriment de ceux dont l'orientation est opposée. Il y a déplacement des parois des domaines. C'est cette phase qui en général est responsable de l'essentiel des pertes, pour les matériaux usuels (tôles FeSi).

**Etape2 :** tous les moments sont maintenant alignés dans le même sens (on n'a plus qu'un seul domaine) mais qui n'est pas celui de l'excitation. Progressivement les moments tournent pour prendre l'orientation de l'excitation.



**Figure 1.11 :** Etape du phénomène d'aimantation d'un matériau ferromagnétique

Si on relève les évolutions de  $B$  en fonction de  $H$ , cela se traduit par la courbe suivante, appelée courbe de première aimantation (on part d'un matériau désaimanté et les évolutions de  $H$  doivent être très lentes).



**Figure 1.12 :** Courbe de première aimantation

Il faut noter que l'on n'atteint la saturation que pour des valeurs très élevées de  $H$  (courants énormes à appliquer).

L'aire comprise entre la courbe de première aimantation et l'axe des ordonnées représente l'énergie volumique nécessaire pour aimanter.

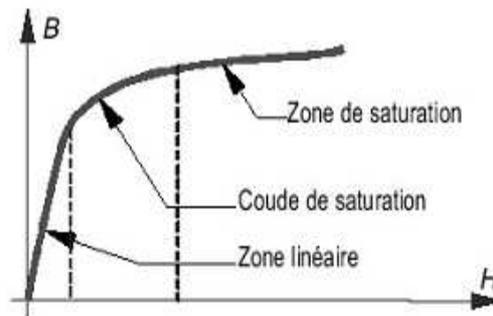
### 1.9 La courbe d'aimantation d'un matériau ferromagnétique

Les courbes décrites par  $B$  en fonction du champ  $H$  sont caractéristiques des matériaux magnétiques ; on en distingue deux :

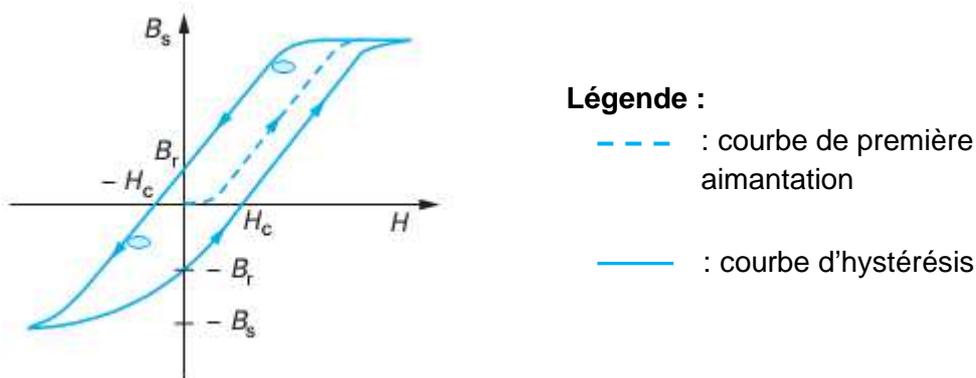
- la courbe de première aimantation (ce qu'on vient de voir dans le paragraphe précédent) ;
- la courbe d'hystérésis.

Ces courbes montrent comment un corps ferromagnétique réagit à l'excitation magnétique  $H$  :

- **Courbe de première aimantation** : courbe  $B = f(H)$  lorsque le corps ferromagnétique ne possède aucune aimantation.
- **Cycle d'hystérésis** : courbe  $B = f(H)$  lorsque le corps ferromagnétique possède déjà une aimantation.



**Figure 1.13** : Décomposition de la courbe de première aimantation



**Figure 1.14** : Courbes d'hystérésis et de première aimantation

On définit plusieurs zones dans la courbe  $B = f(H)$  :

- **Zone linéaire** : dans cette zone,  $B = \mu.H$  avec  $\mu$  constante. C'est cette zone qui est généralement exploitée pour les transformateurs et les machines tournantes.

- **Saturation du milieu ferromagnétique** : lorsque  $H$  devient trop grand,  $B$  ne varie presque plus. Le matériau magnétique est dit saturé. On a toujours  $B = \mu.H$ , mais  $\mu$  n'est plus constant (« il s'écroule »).  $B$  tend vers le champ de saturation  $B_s$ .
- **Champ rémanent  $B_r$**  : champ qui subsiste lorsque  $H = 0$  ( $i_1 = 0$ ).
- **Excitation coercitive  $H_c$**  : excitation  $H$  nécessaire pour annuler le champ rémanent  $B_r$ .
- **Induction à saturation  $B_s$**  : induction maximale où le matériau est imprégné totalement.
- **Hystérésis** : c'est le dédoublement de la caractéristique  $B(H)$  du matériau magnétique. Donc  $B$  dépend non seulement de  $H$ , mais aussi de l'aimantation antérieure. Les substances ferromagnétiques sont donc douées de mémoire.

Le cycle d'hystérésis a pour conséquence :

Il subsiste une induction rémanente  $B_r$  lorsque l'on annule l'excitation. Si l'on souhaite annuler  $B$ , il faut inverser le champ d'excitation  $H$ , on appelle la valeur de ce champ le champ coercitif  $H_c$ .

La forme du cycle d'hystérésis dépend, pour un même matériau :

- de la **température** :  $B_s$  décroît avec la température pour s'annuler à une température appelée température de Curie pour laquelle le ferromagnétisme ou le ferrimagnétisme s'annule, cette température est de l'ordre de  $750^\circ\text{C}$  ;
- de la **fréquence** avec laquelle le cycle est décrit, on montre que l'aire du cycle est proportionnelle aux pertes dans le matériau ;
- des **traitements** que subit le matériau magnétique, la préparation sidérurgique.

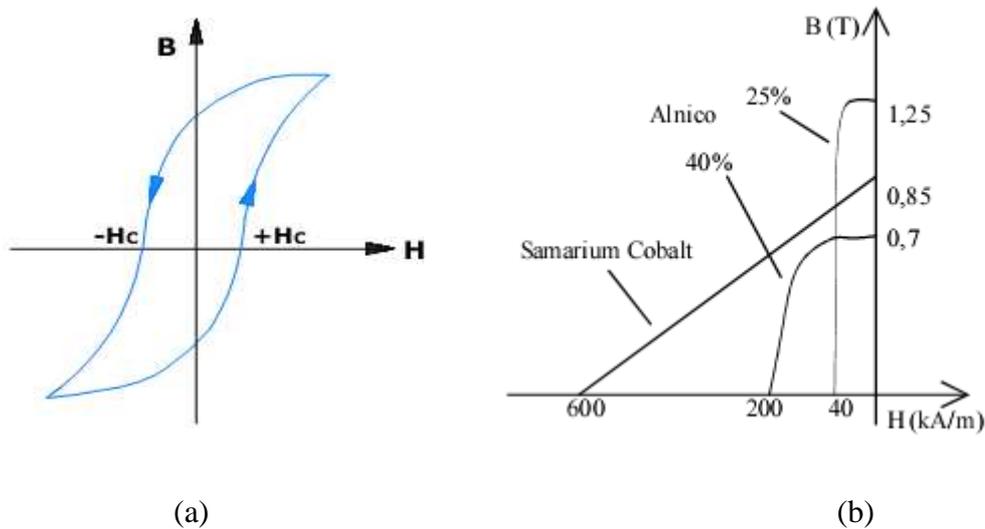
## 1.10 La classification des matériaux magnétiques

Ainsi les formes du cycle d'hystérésis sont différentes et permettent de classer les matériaux magnétiques en deux classes :

### 1.10.1 Les matériaux durs

Ce sont des matériaux présentant une forte aimantation rémanente et difficile à annuler ( $H_c$  est grand). Ils sont utilisés pour faire des aimants permanents (ex : acier). Ce sont des matériaux qui présentent un cycle d'hystérésis très large ( $10^4 \text{ A/m} < H_c < 10^6 \text{ A/m}$ ).

Ils sont utilisés en général comme aimant. On les utilise dans le 4<sup>è</sup> quadrant ( $B > 0$  et  $H < 0$ ).  $H_c$  devient alors le champ démagnétisant à ne pas dépasser.



**Figure 1.15 :** Caractéristiques d'un matériau dur

(a) : Evaluation de  $B = f(H)$

(b) : Caractéristiques d'un aimant

Exemple d'alliages utilisés pour les aimants :

- **Ferrite (oxyde de fer)**

Saturation à  $\approx 0.6$  T

$B_r \approx 0.4$  T –  $H_c \approx 200$  kA/m

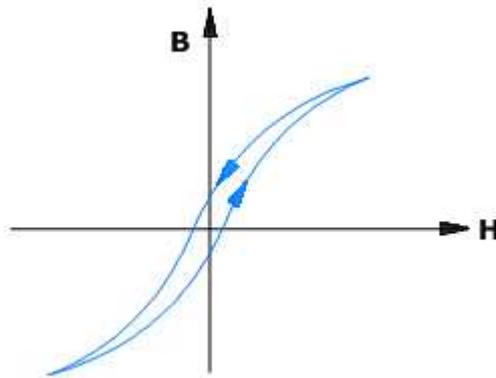
- **Samarium – Cobalt (Sm-Co)**

Saturation à  $\approx 1$  T

$B_r \approx 0.8$  T –  $H_c \approx 500$  kA/m

### 1.10.2 Les matériaux doux

Matériaux qui possèdent une aimantation rémanente facile à annuler ( $H_c$  est petit). A l'opposé des matériaux durs, un matériau doux présente un cycle d'hystérésis très petit voir inexistant ( $10^{-2} A/m < H_c < 100 A/m$ ). C'est la base des machines tournantes ou de tout système magnétique voyant une induction alternative ( $\mu_r$  dans la zone linéaire : 50 à  $10^4$ ).



**Figure 1.16 :** Evaluation de  $B = f(H)$  pour matériaux doux

Ils sont réalisés à base de fer. En fonction de l'alliage utilisé, on trouve différente valeur de champ de saturation  $B_s$  :

Fe :  $B_s \rightarrow 2,2T$

FeSi :  $B_s \rightarrow 1,8T$

(bonne tenue mécanique)

utilisé pour les moteurs et transformateurs

FeCo :  $B_s \rightarrow 2,4T$

faibles pertes,

très chers

Ceramique :  $B_s \rightarrow 0,5T$

très faibles pertes

utilisé dans l'application haute fréquence (HF)

FeNi :  $B_s \rightarrow 1,3T$

faible  $H_c$ ,

il trouve son l'application dans l'alimentation à découpage.

Exemple d'alliages utilisés pour les tôles de transformateurs :

- **FeSi (3,5% de Si)**

Saturation à  $2T$

$B_r \approx 0 - H_c \approx 0$

$\mu_r = 7000$  à  $50Hz$

- **FeSi à grains orientés**

Saturation à  $3T$

$B_r \approx 1,4T - H_c \approx 8A/m$

$\mu_r > 40000$  à  $50Hz$

## 1.11 Propriétés des matériaux magnétiques pour transformateurs

Il s'agit de matériaux doux.

Les propriétés importantes dans nos applications sont :

- Les perméabilités relatives, définies par :

$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B}{H}, \text{ avec } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H / m}$$

- l'induction de saturation ;
- les pertes.

## 1.12 Pertes dans les matériaux magnétiques

On peut classer les mécanismes de pertes en quatre groupes :

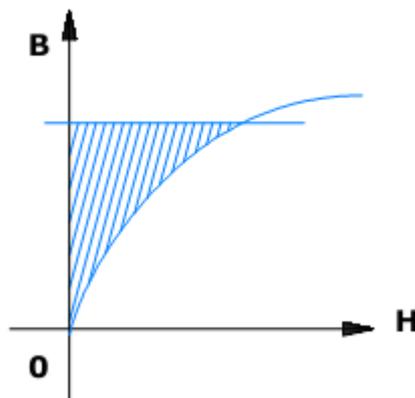
### 1.12.1 Energie magnétisante :

Pour obtenir un champ magnétique au sein d'un matériau, cela nécessite l'apport d'une énergie dite magnétisante. Elle est proportionnelle au volume du matériau :

$$\frac{\partial W}{\partial V} = \int_0^B H \cdot dB \quad (1.3)$$

L'énergie stockable dans un milieu de perméabilité  $\mu$  est :

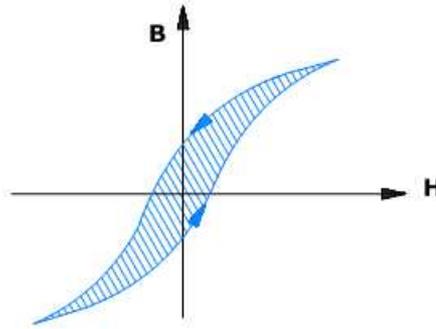
$$W = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu} \quad (1.4)$$



**Figure 1.17 :** Energie magnétisante d'un système non linéaire

Ainsi dans le cas d'un circuit avec un entrefer, l'essentiel de l'énergie viendra se placer dans celui-ci. Les matériaux magnétiques ont un rôle essentiellement de canaliseur, de circuit de transit. Un transformateur n'aura pas d'entrefer, alors qu'une inductance de lissage aura très certainement un entrefer pour faire office de stockage d'énergie afin de ne pas saturer le circuit.

### 1.12 .2 Les pertes par hystérésis



**Figure 1.18 :** Courbe d'hystérésis d'un matériau magnétique

Ce type de perte est lié au cycle d'hystérésis du matériau. Le parcours du cycle  $B = f(H)$  fait apparaître une perte d'énergie qui correspond alors à un échauffement de la matière. Elles sont donc proportionnelles à la fréquence et sont liées à la structure du matériau.

On modélise souvent la puissance dissipée par ces pertes par :

$$P_{\text{hystérésis}} = K_f \cdot B_m^2 \cdot f \quad (1.5)$$

où

$B_m$  : l'induction maximale exprimée en Tesla ;

$f$  : la fréquence du cycle par seconde ;

$K_f$  : coefficient dépendant de la substance magnétique que constitue le matériau magnétique. Il varie de 100 à 500.

Dans le cadre du transformateur, on utilise des matériaux doux pour cette simple raison.

### 1.12 .3 Les pertes dites par courants de Foucault

Les variations du champ magnétique dans la matière génèrent par induction des courants induits qui se rebouclent sur eux-mêmes. Ces courants ne peuvent circuler que dans une faible épaisseur dite épaisseur de peau. Il y a donc échauffement par effet Joule. Cette fois-ci ces pertes sont proportionnelles au carré de la fréquence :

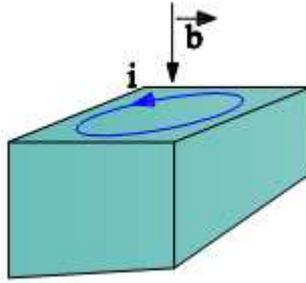
$$P_{\text{Foucault}} = K_f \cdot B_m^2 \cdot f^2 \quad (1.6)$$

avec :

$B_m$  : l'induction maximale exprimée en Tesla ;

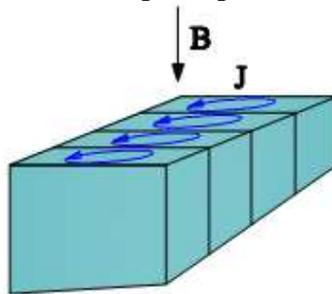
$f$  : la fréquence du cycle par seconde ;

$K_f$  : coefficient dépendant de la substance magnétique que constitue le matériau magnétique. Il varie de 100 à 500.



**Figure 1.19** : Spire en court-circuit dans un matériau ferromagnétique

Une façon efficace de réduire les pertes par courants de Foucault consiste à fractionner le circuit magnétique en  $N$  tôles parallèles aux lignes d'induction. En d'autre terme, feuilletter le circuit magnétique. La figure en illustre le principe.



**Figure 1.20** : Réduction des pertes par courants de Foucault par fractionnement du circuit ferromagnétique

#### 1.12.4 Les pertes supplémentaires

Elles sont dues à d'autres phénomènes : trainage magnétique, pertes par relaxation, etc....

##### *Remarques*

- Ces mécanismes de pertes dépendent beaucoup de la structure des matériaux.
- Les constructeurs donnent des courbes ou des formules approchées pour le calcul des pertes en mode sinusoïdal.
- Pour des inductions créées par d'autres formes de signaux, il faut tenir compte des harmoniques. Mais une bonne estimation est donnée en ne considérant que le fondamental.
- Dans le fonctionnement en impulsions, on détermine l'énergie perdue par impulsion en la multipliant par la fréquence de répétition de l'impulsion, on obtient la valeur des pertes.

## 2 Familles de matériaux magnétiques pour transformateurs

Nous allons classer ces matériaux en trois familles selon leurs structures :

- Les alliages métalliques ;
- Les poudres d'alliages métalliques compactées ;
- Les oxydes magnétiques : les ferrites.

Les alliages métalliques :

On peut distinguer :

- ❖ trois types d'alliages à base de :
  - fer avec addition de silicium ;
  - fer et nickel ;
  - fer et cobalt.
- ❖ trois modes de préparation
  - tôles obtenues par laminage à froid et découpées, on réalise ensuite soit des profils découpés qui seront empilés et imprégnés, soit des circuits enroulés et imprégnés (coupés circuits dit en C ou en E, soit non coupés tels que les tores) ;
  - tôles amorphes obtenues par trempé rapide d'un alliage contenant de l'ordre 70% d'atomes de Fe, Ni ou Co et 30% de métalloïdes (B, Si, C). On obtient un mince ruban d'épaisseur 30 $\mu$ m, les circuits sont réalisés comme les circuits enroulés présentés ci-après ;
  - tôles nanocristallines, ce sont des tôles amorphes ayant subi un traitement thermique qui a fait cristalliser une partie du matériau en grain cristallin de 10 à 15nm de diamètre, le pourcentage d'atomes de Fe, Ni ou Co peut être porté à 80%, les circuits sont réalisés comme présentés précédemment.

Les formes obtenues sont :

- pour les tôles prédécoupées : forme en E, U et en L dit PTT ;
- pour les tôles enroulées : tores, circuits roulés, et découpés en C ou en E.



(a)



(b)



(c)

**Figure 1.21** : Formes obtenues du circuit magnétique

- (a) : en E
- (b) : en U
- (c) : en tore

### 1.13.1 Les alliages de Fer-Silicium

Il existe un large éventuel de qualités qui diffèrent par :

- la teneur en silicium comprise entre 3 et 3.5%, limite au-delà de laquelle on ne peut plus laminier à froid ;
- la teneur en impuretés ;
- la cristallisation.

Dans ce type d'alliage Fe-Si, on distingue des tôles dites à grains non orientés (NO), des tôles dites à grains orientés (GO). Cette dernière représente une faible perte et s'aimante facilement.

Le choix de tôle ou de bande est conditionné par la fréquence de travail et le niveau de perte désiré.

Il en existe plusieurs épaisseurs pouvant aller de 0.025mm à 0.5mm mais l'épaisseur la plus courante est de 0.1mm, ce qui convient particulièrement à une utilisation dans la gamme de fréquence 400Hz.

Des alliages à plus forte teneur en silicium typiquement 6% sont en développement au Japon, ces alliages présentent des pertes 2,5fois plus faibles que les alliages dit standards à des fréquences entre 10 et 20KHz.

### 1.13.2 Les alliages Fer-Nickel

Alors que le fer –silicium se présente habituellement comme un produit sidérurgique de grande consommation, les alliages fer-nickel sont des produits plus délicats, élaborés avec les plus grands soins à tous les stades de la fabrication. Ils trouvent leurs applications essentielles dans les champs magnétiques faibles ou moyens.

Les seuls alliages intéressants sont ceux dont la composition est comprise entre 30 et 86% de nickel.

On peut classer ces alliages en trois familles :

- **la famille des invars** avec une teneur en nickel de 36% qui présentent une aimantation à saturation relativement élevée (1,3T) et une grande résistivité électrique  $\rho=75\mu\Omega\text{m}$ . Ils sont utilisés principalement dans les applications de téléphonie et dans les transformateurs fonctionnant à fréquences élevées (transformateurs à impulsion de puissance élevée). Le choix de l'épaisseur de bande est conditionné, dans le cas d'un transformateur à impulsion, par la largeur et la fréquence de répétition de l'impulsion.
- **la famille des fers-nickel 50-50**, quant à ces alliages, ils possèdent l'aimantation à saturation la plus élevée ( $B_s \leq 1,6\text{T}$ ). Ils sont utilisés sous forme de tores et de profils spéciaux pour la fabrication d'amplificateurs magnétiques.
- **La famille des fer-nickel à forte teneur en nickel** comprise entre 70 et 80% qui offrent de grande perméabilité. Ces performances sont néanmoins limitées par plusieurs facteurs :
  - une aimantation à saturation faible (0,1 à 0,8T) ;
  - une faible résistivité électrique ;
  - une grande sensibilité aux contraintes thermomécaniques.

### 1.13. 3 Les alliages Fer-Cobalt

Les alliages  $\text{Fe}_{49}\text{Co}_{49}\text{Va}_2$  commercialisés (AFKSO2 par la société Imphy et Vacoplux par la société Vacumschmetz) sont une alternative aux alliages fer-silicium avec une aimantation à saturation qui dépasse 2,3T.

### **Domaine d'utilisation**

Ces alliages sont particulièrement utilisés dans la réalisation de transformateurs à haute puissance spécifique.

## Chapitre 2 : LES ENROULEMENTS DES TRANSFORMATEURS

### 2.1 Généralités

Il existe une grande diversité de dispositions des enroulements qui obéissent cependant à quelques règles dictées par des considérations :

- magnétiques (réduire les espaces de perméabilité relative faible entre nappe de courants et matériau magnétique) ;
- diélectriques (ménager des intervalles où placer des isolants) ;
- électriques (réaliser des connexions aux réseaux situés en amont et en aval du transformateur) ;
- thermiques (prévoir la circulation de fluides caloporteurs (air ou huile).

### 2.2 Structure des matériaux conducteurs pour la réalisation de bobinage des transformateurs

En général, les enroulements des transformateurs sont faits avec du cuivre ou de l'aluminium.

#### 2.2.1 Le cuivre

C'est le conducteur de base le plus utilisé pour la réalisation des bobinages.

Il est utilisé soit à l'état pur (cuivre électrolytique), soit faiblement allié pour lui donner des qualités particulières, soit sous forme d'alliages proprement dits : laiton, bronze, couramment employé pour la réalisation de connexions et bus barres.

Les diamètres de fil de cuivre les plus couramment utilisés varient de 20  $\mu\text{m}$  à plusieurs millimètres.

Pour des raisons d'encombrement et de montée de fréquence, les fils de grands diamètres seront remplacés par des méplats, des multibrins ou fils divisés. Nous verrons un peu plus tard le but de ce remplacement.

Le cuivre, en dehors de sa faible résistivité présente l'avantage considérable sur l'aluminium de se souder et de se braser facilement.

#### 2.2.2 L'aluminium

L'aluminium est peu coûteux et beaucoup plus léger ; sa résistivité 1,65 fois supérieure à celle du cuivre, oblige à employer des sections plus élevées si l'on désire conserver le même niveau de pertes joules. Par contre, la masse des conducteurs avec l'aluminium sera toujours à pertes égales 2 fois plus faibles qu'avec l'emploi du cuivre.

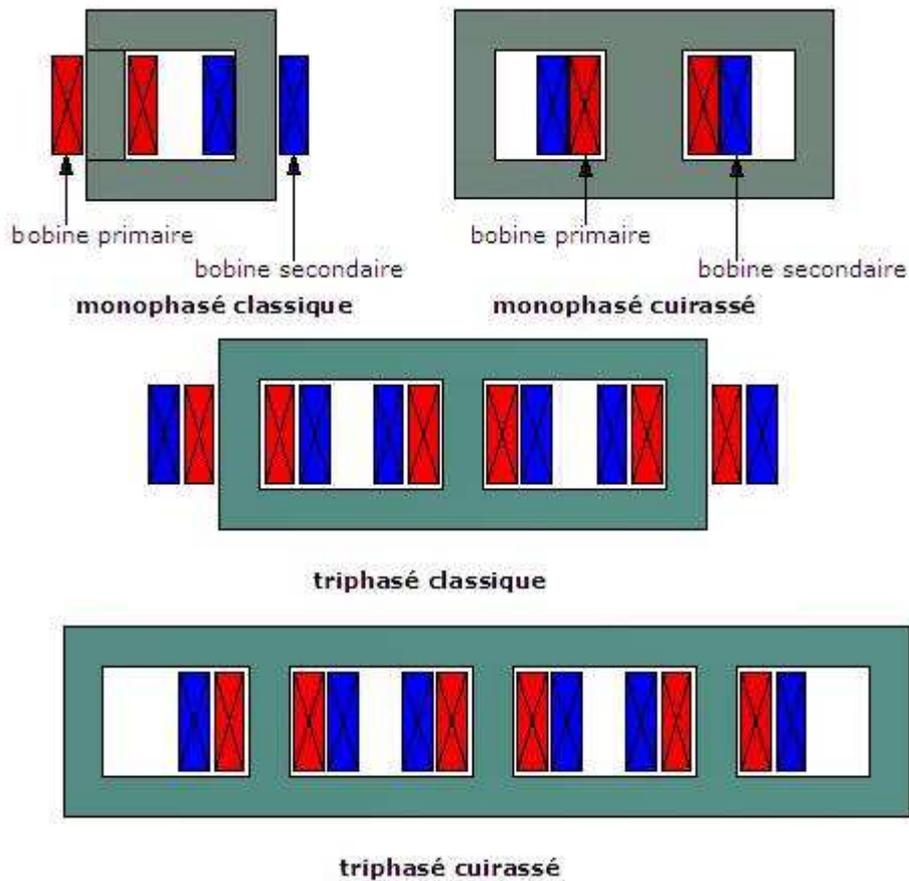
L'aluminium anodisé peut être employé sous forme de fils ou de bandes, toutefois certaines précautions doivent être prises : il faut notamment veiller à ne pas dépasser l'effort maximal de traction admissible pour ne pas rompre la continuité de l'isolation du fil.

| Matériau       | Coefficient de température $\alpha$ | Conductivité $1/\rho$ à 20°C ( $\mu\Omega.m$ ) <sup>-1</sup> |
|----------------|-------------------------------------|--|
| Argent (Ag)    | 0,0038                              | 62,5   |
| Cuivre (Cu)    | 0,0038                              | 58   |
| Or (Au)        | 0,0034                              | 45   |
| Aluminium (Al) | 0,0039                              | 36   |
| Laiton         | 0,0014                              | 14   |

**Tableau 2.1 :** Caractéristiques des principaux matériaux conducteurs utilisés dans un bobinage

Pour les transformateurs de distribution, chaque colonne du noyau porte au moins deux enroulements :

- un primaire associé généralement à la haute tension (HT) ;
- un secondaire associé à la basse tension (BT).



**Figure 2.1 :** Disposition de conducteurs dans un transformateur

Ils sont constitués de fils conducteurs en cuivre ou en aluminium de section circulaire ou rectangulaire :

- les fils ronds présentent un diamètre inférieur à 3 mm, cette valeur étant liée à l'effet de peau à la fréquence de fonctionnement (50Hz) ;
- les méplats sont utilisés pour les transformateurs de puissance élevée ; ils sont disposés dans l'axe des colonnes pour éviter qu'ils ne soient pas le siège de courants de Foucault intenses.



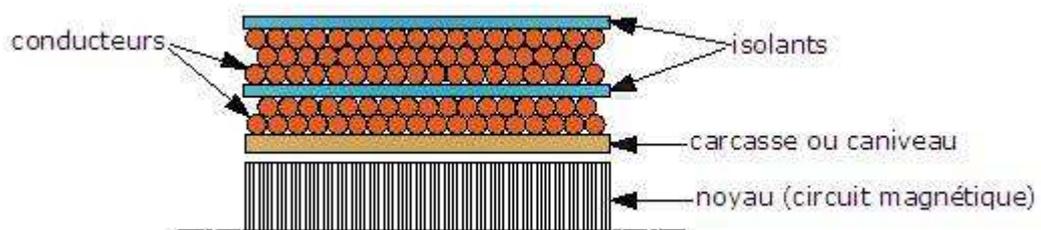
**Figure 2.2 :** Conducteurs en cuivre émaillé de diamètre rond



**Figure 2.3 :** Conducteurs en aluminium de forme méplat

Ainsi ; tous ces conducteurs doivent en outre être immobilisés mécaniquement car ils transmettent, en charge, des forces de Laplace importantes, qui occasionnent des vibrations supplémentaires.

### 2.3 Structure de bobinage d'un transformateur

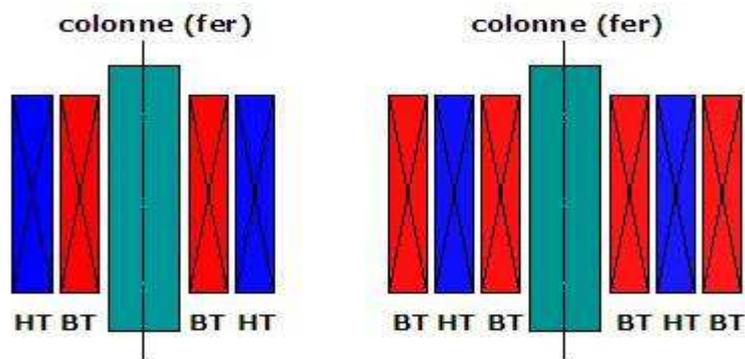


**Figure 2.4 :** Vue en coupe d'un bobinage d'un transformateur

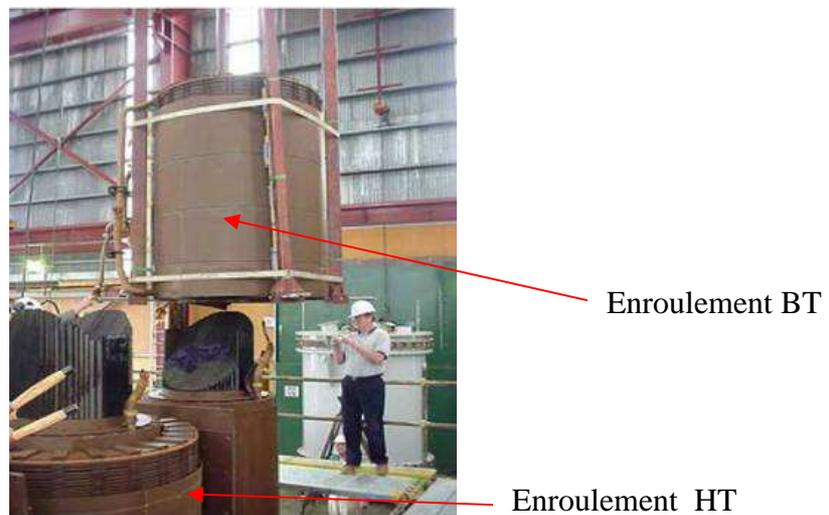
Cette figure représente un composant bobiné et ses différents isolants ou diélectriques. Le bobinage est généralement réalisé sur une carcasse ou caniveau isolant qui peut être en matières plastiques injectées ou extrudées ou en résine armée de fibres de verre, éventuellement en céramique lorsque des problèmes de dissipation thermique sont rencontrés ou métallique. Sur cette carcasse sont bobinés plusieurs tours (spires) d'un conducteur constituant plusieurs couches ou enroulements concentriques.

Dans la technologie de fabrication des enroulements des transformateurs, il existe différents types de bobinages, à savoir :

### 2.3.1 Bobinage dit concentrique



**Figure 2.5 :** Schéma de principe d'un bobinage concentrique



**Figure 2.6 :** Montage d'un enroulement BT d'un transformateur bobiné concentriquement

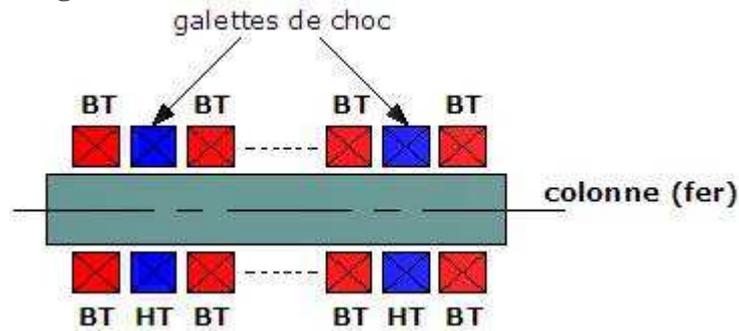
Les enroulements HT et BT, rarement situés sur des colonnes différentes pour favoriser le couplage serré des inductances de fuites propres, sont presque toujours concentriques avec l'enroulement BT placé à l'intérieur.

Ce type de bobinage utilise toute la longueur des jambes du circuit magnétique et est réalisé en une ou plusieurs couches alternées des deux enroulements.

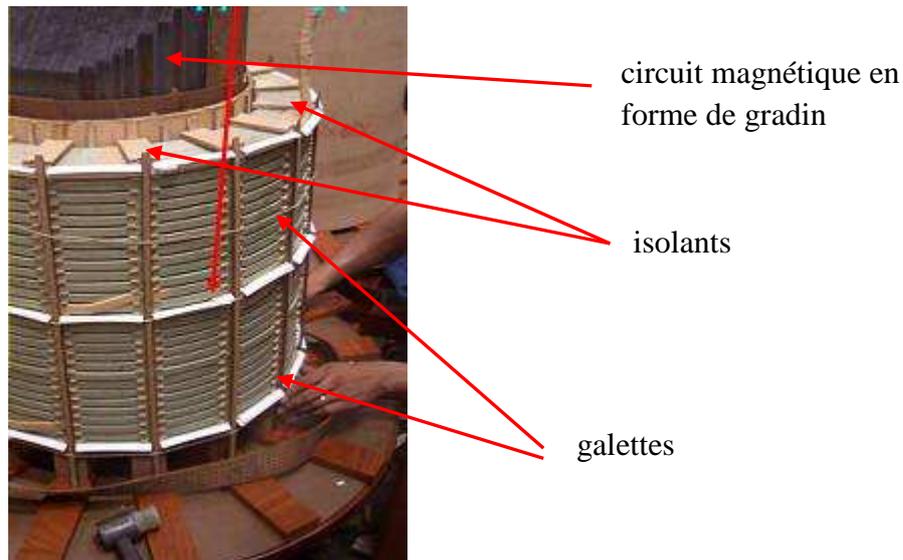
L'inductance de fuite est d'autant plus faible que le bobinage est long. Elle peut être diminuée en alternant des couches du primaire et celle du secondaire.

La capacité dynamique est d'autant plus grande que le bobinage est long. Elle est diminuée en augmentant l'isolant entre deux couches de bobinages différents.

### 2.3.2 Bobinage dit en galette



**Figure 2.7 :** Schéma de principe d'un bobinage en galette



**Figure 2.8 :** Préparation d'un enroulement disposé en galette

La disposition alternée consiste à superposer autour d'une même colonne des galettes BT et HT en les séparant par des isolants et en disposant des galettes BT aux extrémités.

Le bobinage HT est toujours divisé en galettes dont la tension est limitée à 1000V pour éviter un claquage des isolants.

Ce type de bobinage utilise une partie ou toute de la hauteur disponible et sont disposées côte à côte dans la longueur du circuit magnétique. On met en série les galettes d'enroulements de même type pour avoir le bobinage complet.

Les premiers éléments situés près des extrémités sont soumis à des contraintes diélectriques sévères du fait de surtension ; ils comportent donc le moins de spires et forment alors des galettes dites de « choc ». Le nombre de ces galettes, pour un transformateur donné, dépend de son type (monophasé ou triphasé) et du couplage HT utilisé en triphasé.

**Exemple :**

Il faut deux galettes de choc par phase pour un couplage triangle tandis qu'un couplage étoile ou zigzag n'en réclame qu'une seule par phase.

Il en existe d'autres types de bobinages, à savoir :

- bobinage à nid d'abeilles ;
- bobinage au « pas de pèlerin » ;
- bobinage « deux fils en main ».

Ces derniers sont utilisés lors de la réalisation des transformateurs à haute fréquence alors qu'au commencement, on a signalé que nous ne nous intéressons qu'au transformateur de fréquence industrielle (50 ou 60Hz).

## 2.4 Isolement des conducteurs

Les émaux isolants sont destinés à isoler les conducteurs employés dans les bobinages. Ces diélectriques sont en général des vernis ou résines dont la classe de température, présentée dans le tableau ci-dessus, définit les températures maximales d'utilisation pour une durée de vie bien déterminée.

| Classes | Températures maximales<br>en °C |
|---------|---------------------------------|
| Y       | 90                              |
| A       | 105                             |
| E       | 120                             |
| B       | 130                             |
| F       | 155                             |
| H       | 180                             |
| C       | >180                            |

**Tableau 2.2 :** Classification des isolants en fonction des températures maximales admissibles en continu

Dans les principales familles de conducteurs, on distingue :

- *les fils émaillés soudables* basse et haute température grade I et grade II. Ces fils présentent l'avantage de pouvoir se braser à l'étain sans avoir de dénuder la couche d'émail qui est détruite à partir d'une température voisine de 375°C.
- *les fils émaillés non soudables* : le dénudage se fait chimiquement ou mécaniquement.
- *les fils thermodhérents* qui permettent de réaliser à une température donnée un bobinage préformé.

Certains fils émaillés sont guipés, c'est-à-dire protégés par une couche de protection en soie naturelle, nylon, acétate, etc....

## 2.5 Choix d'un fil émaillé

Le choix d'un fil émaillé va dépendre :

- *de ces caractéristiques géométriques* : grade I, II ou III correspondant aux épaisseurs ou surépaisseurs de vernis ;
- *de son aptitude au bobinage* appelée couramment résistance mécanique de l'émail ;
- *de sa tension de claquage*, on admet typiquement :
  - 110V/μm en classe E ;
  - 150V/ μm en classe F ;
  - 180V/ μm en classe H.
- *de sa résistance aux agents chimique*

| Caractéristiques                 | Formal polyvinylique<br>Classe E | Polyester téréphtalique<br>Classe F | Esterimide<br>Classe H | Polymide<br>Classe H |
|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|------------------------|----------------------|
| Aptitude au bobinage             | 1 <sup>e</sup>                   | 3 <sup>e</sup>                      | 2 <sup>e</sup>         | 4 <sup>e</sup>       |
| Tenue en tension                 | 4 <sup>e</sup>                   | 3 <sup>e</sup>                      | 2 <sup>e</sup>         | 1 <sup>e</sup>       |
| Résistances aux agents chimiques | 3 <sup>e</sup>                   | 3 <sup>e</sup>                      | 2 <sup>e</sup>         | 1 <sup>e</sup>       |

**Tableau 2.3** : Classement par ordre décroissant des différents types de vernis

## 2.6 Choix des matériaux isolants

Les conducteurs formant les enroulements concentriques sont isolés entre eux-mêmes. Ces derniers, à leur tour, sont séparés entre eux par  $n$  couches de films ou composites qui constituent l'isolement.

Cet isolement doit permettre de tenir le gradient de tension appliquée et de supporter :

- les efforts mécaniques normaux et permanents résultant du fonctionnement ;
- les efforts exceptionnels et de brève durée dont les plus dangereux sont engendrés par les court-circuits et démarrages en pleine charge.

Cet isolement est souvent renforcé par une imprégnation liquide, gaz ou solide. Les techniques d'isolation liquide et gaz sont généralement utilisées dans les applications de fortes puissances et de haute tension.

Les buts de l'imprégnation sont multiples :

- l'emploi d'un imprégnant de permittivité voisine à celle de l'isolant permet de rendre le champ électrique homogène, ce qui évite ainsi les amorçages locaux ;
- l'imprégnation avec un imprégnant suffisamment dur donne des bobinages présentant une bonne tenue mécanique ;
- le remplissage des alvéoles ou vacuoles d'air par un imprégnant approprié permet d'éviter les décharges partielles ;
- la plupart des isolants sont avides d'humidité aussi est-il indispensable de maintenir par l'imprégnation des performances obtenues après séchage.

Le choix d'une matière isolante se fait à partir de ses principales caractéristiques thermiques, électriques et mécaniques. (Voir annexe)

Les caractéristiques électriques essentielles dans le choix d'un matériau isolant sont :

- la perméabilité relative  $\epsilon_r$  ;
- la résistance d'isolement en régime continu ;
- la rigidité diélectrique  $E_C$  (V/  $\mu\text{m}$ ) qui est le champ électrique maximal auquel peut être soumise une épaisseur d'isolant donnée sans apparition de claquage ;
- la tangente de l'angle de pertes qui influe sur les pertes diélectriques.

Au niveau des caractéristiques mécaniques, on s'intéresse au coefficient de dilatation linéaire ou d'expansion volumique, à la dureté et au module de Young.

## 2.7 Pertes et échauffement dans les enroulements des transformateurs

Les pertes dans les conducteurs présentent deux composantes, ce sont :

- les pertes par effet Joule ;

- les pertes par courants de Foucault :
  - Les courants induits par le flux du champ créé par le conducteur lui-même (qui chassent vers la surface du conducteur : c'est l'effet de peau) ;
  - Les courants induits par le flux créé par des éléments extérieurs (autres conducteurs du même ou d'un autre bobinage : c'est l'effet de proximité).

Pour un transformateur, il y a deux principaux modes de refroidissement :

- la dissipation par conduction, le calcul de l'échauffement est effectué en prenant en compte toutes les résistances thermiques des constituants et interfaces ;
- la dissipation par convection où l'échauffement  $\Delta\theta$  est estimé par l'expression :

$$\Delta\theta = k.(pertes_{totales} / surface_{d'échange})^{0.8} \quad (2.1)$$

avec  $k$  : 445 pour l'échauffement superficiel dans l'air

$k$  : 85 pour l'échauffement superficiel d'un composant immergé dans l'huile.

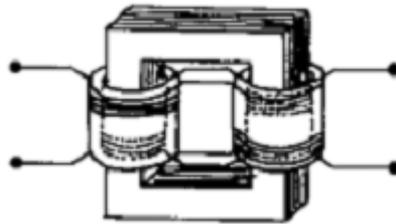
## Chapitre 3 : TRANSFORMATEUR MONOPHASE

### 3.1 Constitution

Un transformateur monophasé est constitué d'un circuit magnétique fermé (réalisé avec des tôles isolées) sur lequel on monte deux enroulements concentriques afin que le couplage soit le meilleur possible. Le premier enroulement, celui qui reçoit la tension à transformer est appelé « primaire » alors que le second, aux bornes duquel on récupère le fruit de la transformation, est appelé « secondaire ».

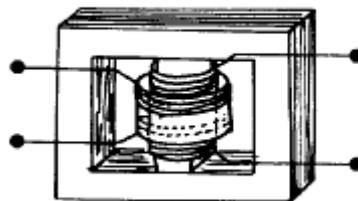
On trouve principalement deux structures :

- La première comporte un circuit magnétique à deux noyaux, chaque noyau portant la moitié des bobinages primaire et secondaire. On pourra par exemple mettre les deux demi enroulements primaires en série ainsi que ceux des deux demi secondaires.



**Figure 3.1 :** Transformateur classique

- La seconde comporte un circuit magnétique cuirassé. Une colonne centrale porte l'ensemble des bobinages primaire et secondaire alors que les colonnes latérales servent à fermer le circuit magnétique.



**Figure 3.2 :** Transformateur cuirassé

Dans les deux cas, le transformateur est représenté schématiquement de la façon suivante :

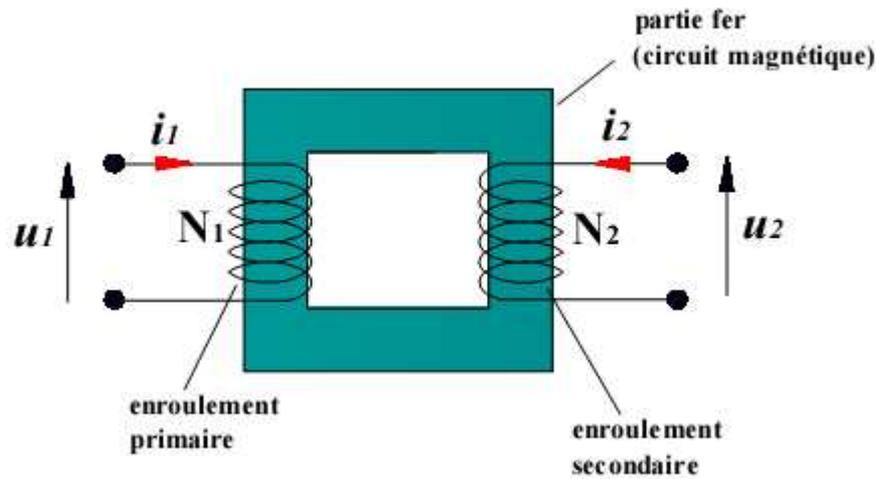


Figure 3.3 : Représentation schématique d'un transformateur

Les symboles fréquemment utilisés pour le transformateur monophasé sont :

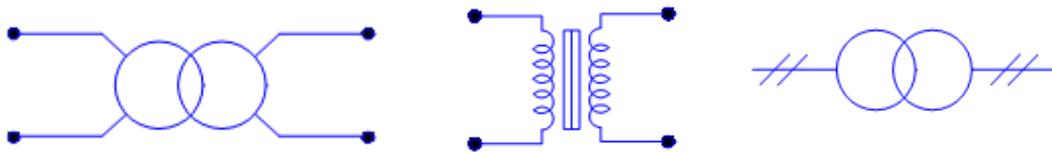


Figure 3.4 : Symboles d'un transformateur monophasé

### 3.2 Principe de fonctionnement

❖ *Rappel :*

**Loi de Faraday :**

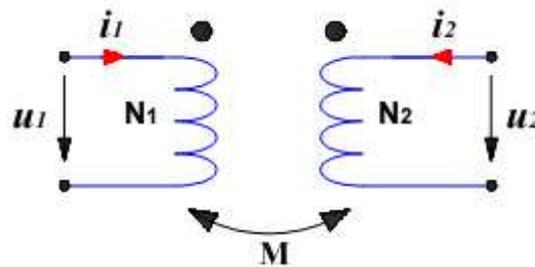
Une variation de flux à travers une spire crée une force électromotrice (f.é.m.) "e". Inversement une f.é.m. "e" dans une spire crée une variation de flux à travers celle-ci.

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (4.1)$$

Avant d'entamer ce paragraphe, précisons la convention qu'on va adopter pour la suite de notre étude. Pour cela, choisissons cette convention :

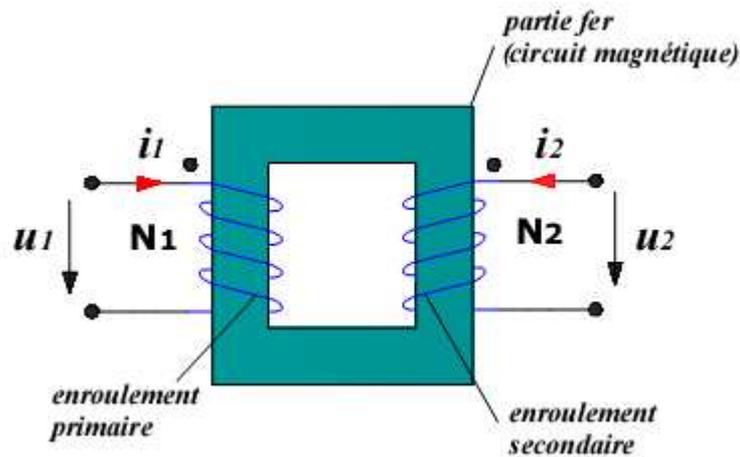
- Les points matérialisent le sens des enroulements ;
- On adopte la convention « récepteur » pour branche ;

- Les forces magnétomotrices sont comptées positivement lorsque les courants rentrent par les points et négativement lorsqu'ils en sortent ;
- $M$ , l'inductance mutuelle portera un signe « + » devant lui.



**Figure 3.5 :** Convention de signe et sens de tensions

Un transformateur simplifié comporte au moins deux enroulements et un circuit magnétique.



**Figure 3.6 :** Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur

Le principe de fonctionnement d'un transformateur est basé sur l'utilisation du phénomène électromagnétique. En effet, lorsque l'enroulement primaire est alimenté par une source de tension alternative, dans ce dernier apparaît un courant alternatif créant dans le circuit magnétique un flux variable  $\phi$ . En se fermant dans le circuit magnétique, ce flux est alors embrassé par les deux enroulements (primaire et secondaire) et crée dans ces derniers des f-é-m induites :

- f-é-m induite d'auto-induction dans le primaire

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (4.2)$$

- f-é-m induite d'induction mutuelle dans le secondaire

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (4.3)$$

où  $N_1$  et  $N_2$  sont respectivement le nombre de spires au primaire et au secondaire.

Lorsqu'une charge  $Z_{ch}$  est branchée au secondaire sous l'effet de la f-é-m  $e_2$ , un courant  $i_2$  y circule et une tension  $u_2$  apparaît à ses bornes.

On constate alors que le phénomène électromagnétique permet de transférer l'énergie électrique du primaire vers le secondaire sans qu'il y a une liaison électrique entre les deux enroulements qui sont, de ce fait, isolés l'un de l'autre électriquement.

En utilisant la loi d'Ohm généralisée, on aura :

$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (4.4)$$

$$u_2 = R_2 \cdot i_2 + N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (4.5)$$

où  $R_1$  et  $R_2$  sont les résistances des enroulements primaire et secondaire.

Des expressions (1) et (2), ils ressortent que  $e_2$  ne diffère de  $e_1$  que par le nombre de spires.

Par conséquent, en choisissant le nombre de spires appropriées au primaire et au secondaire, on peut fabriquer d'un transformateur avec différents rapports de transformation.

A noter que le transformateur est un appareil en courant alternatif et ne fonctionne pas avec du courant continu. En effet, si on l'alimente avec du courant continu ; on aura :

$$\frac{d\phi}{dt} = cte \text{ et } e_1 = e_2 = 0$$

### 3.3 Transformateur parfait

C'est un transformateur virtuel sans aucune perte. Il est utilisé pour modéliser les transformateurs réels. Ces derniers sont considérés comme une association d'un transformateur parfait et de diverses impédances.

Un transformateur idéal est caractérisé par les hypothèses suivantes :

- résistances des enroulements nulles :  $R_1 = R_2 = 0$  ;
- perméabilité du circuit magnétique infinie :  $\mu_{Fe} = \infty$  ;
- pertes fer nulles :  $P_{Fe} = 0$

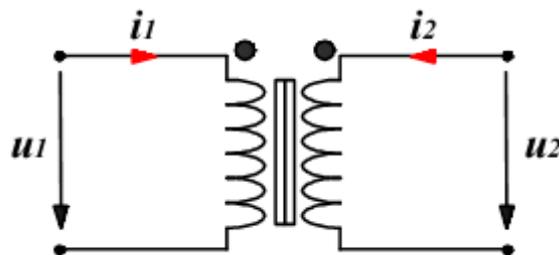


Figure 3.7 : Schéma d'un transformateur parfait

La première hypothèse signifie qu'on néglige les pertes Joule dans les enroulements.

La deuxième hypothèse entraîne que le circuit magnétique constitue un court-circuit magnétique parfait et que par conséquent il n'existe pas d'autres flux que le flux  $\Phi$  commun aux deux enroulements, confiné dans le circuit magnétique. C'est-à-dire que le couplage entre les deux enroulements est total :

$$M = \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad (4.6)$$

où  $L_1$  et  $L_2$  sont respectivement les inductances propres des enroulements primaire et secondaire.

Par ailleurs, la perméance du circuit est telle qu'une solénoïde résultante nulle suffit, à la limite, pour assurer la circulation du flux.

La troisième hypothèse veut dire qu'on ne tient pas compte les pertes par hystérésis.

Les équations des tensions deviennent :

$$u_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (4.7)$$

$$u_2 = e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (4.8)$$

Puisque les courants rentrent par les points indiquant la tête des enroulements, la relation d'Ampère régissant la solénoïde résultante vaut :

$$\theta = R_m \cdot \phi = N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2 \quad (4.9)$$

Puisque le transformateur est parfait  $R_m$ , la relation d'Ampère devient :

$$0 = N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2 \quad (4.10)$$

En effet, compte tenu du fait qu'on a supposé la perméabilité du fer très grande, le potentiel magnétique nécessaire à la circulation du flux est nul :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = 0 \Leftrightarrow N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2 = 0 \quad (4.11)$$

### 3.3.1 Rapport de transformation

Désignons par les indices 1 et 2 les enroulements dont l'indice 1 est réservée au enroulement primaire tandis que l'indice 2 celle du secondaire.

Le quotient des tensions induites primaire et secondaire définit le rapport de transformation  $\ddot{u}$

$$\ddot{u} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4.13)$$

Le rapport des courants vaut :

$$-\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{\ddot{u}} \quad (4.14)$$

On a donc pour le transformateur idéal :

$$u_1 \cdot i_1 = -u_2 \cdot i_2 \quad (4.15)$$

Si la tension  $u_1$  est sinusoïdale, les relations précédentes exprimées sous forme complexe deviennent :

$$\underline{U}_1 = \frac{N_1}{N_2} \cdot \underline{U}_2 = \ddot{u} \cdot \underline{U}_2 \quad (4.16)$$

$$\underline{I}_1 = -\frac{N_2}{N_1} \cdot \underline{I}_2 = -\frac{\underline{I}_2}{\ddot{u}} \quad (4.17)$$

En combinant les relations (4.16) et (4.17) et en tenant compte de (4.11) et (4.12), il vient :

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot \frac{\underline{U}_2}{-\underline{I}_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_{ch}} = \ddot{u}^2 \cdot \underline{Z}_{ch} \quad (4.18)$$

Le courant  $\underline{I}_{ch}$  circulant dans la charge définie par l'impédance  $\underline{Z}_{ch}$  s'obtient en appliquant au circuit extérieur secondaire la convention « récepteur ».

$$\underline{I}_{ch} = -\underline{I}_2 \quad (4.19)$$

$$\underline{Z}_{ch} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_{ch}} \quad (4.20)$$

Le transformateur idéal transforme ainsi :

- Les tensions dans le rapport des nombre de spires ;
- Les courants dans le rapport inverse ;
- Les impédances dans le rapport au carré.

En effet ;

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \ddot{u} ; \frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{\ddot{u}} \text{ et } \frac{Z_1}{Z_2} = \ddot{u}^2 \quad (4.21)$$

Compte tenu des relations qui précèdent, on constate que les puissances apparentes primaire et secondaire sont égales.

En effet ;

$$S_1 = U_1 \cdot I_1 \quad (4.22)$$

$$S_2 = U_2 \cdot I_2 \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} U_1 \cdot I_1 &= U_2 \cdot \frac{N_1}{N_2} \cdot I_2 \cdot \frac{N_2}{N_1} \\ &= U_2 \cdot I_2 \end{aligned}$$

D'où :

$$S_1 = S_2 \quad (4.24)$$

Le rapport de transformation caractérise entièrement le transformateur idéal. Nous allons le schématiser par le symbole suivant :

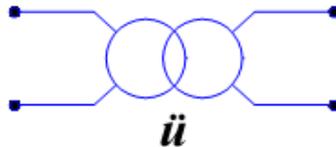


Figure 3.8 : Symbole d'un transformateur idéal

### 3.4 Transformateur réel

Dans cette partie, la résistance des enroulements sont tenue compte, la perméabilité magnétique du circuit magnétique n'est plus infinie, il y a des fuites de flux et les pertes dans le fer ne sont plus nulles.

#### 3.4.1 Equations des forces magnétomotrices

Supposons que le transformateur fonctionne à vide, c'est-à-dire  $I_2 = 0$ , dans ce cas le courant  $I_0$  traversant l'enroulement primaire est appelé courant à vide.

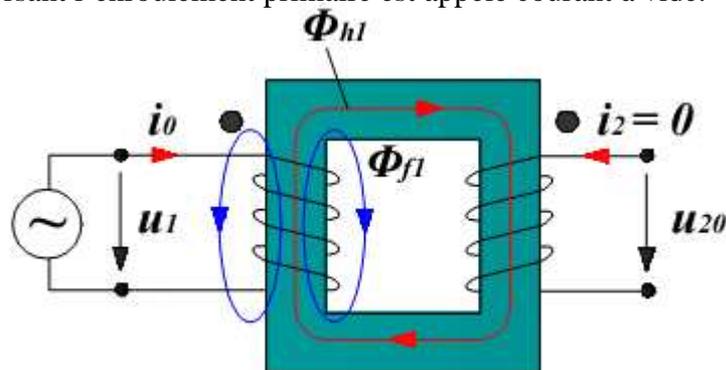
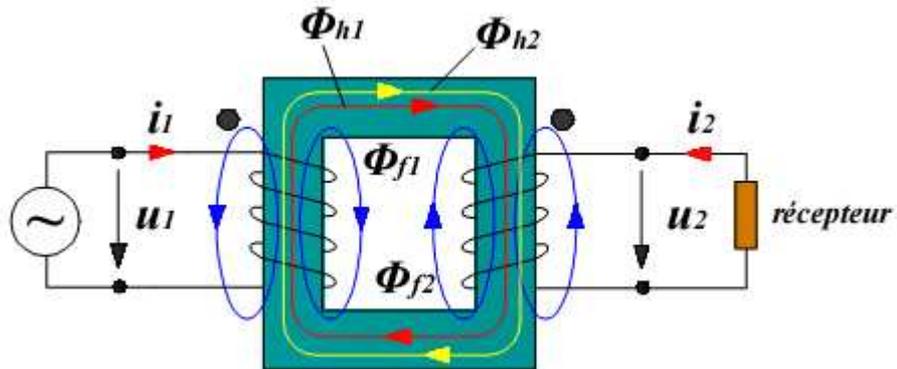


Figure 3.9 : Schéma d'un transformateur fonctionnant à vide

La force magnétomotrice (fmm) engendre un flux principal :

$$\phi_m = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot N_1 \cdot \Lambda_h \tag{4.25}$$

avec  $\Lambda_h$  la perméance du circuit magnétique.



**Figure 3.10 :** Schéma d'un transformateur fonctionnant en charge

Si maintenant, on charge le transformateur avec une charge  $Z$ , dans l'enroulement secondaire circulerait un courant  $I_0$  et le courant dans le premier enroulement augmenterait jusqu'à une valeur  $I_1$ . Dans ce cas le flux  $\phi_m$  est alors créé par  $N_1 \cdot I_1$  et  $N_2 \cdot I_2$  donc :

$$\phi_m = \sqrt{2} (N_1 \cdot I_1 + N_2 \cdot I_2) \tag{4.26}$$

Mais ce flux peut être déterminé par la relation

$$\phi_m = \frac{U_1}{4.44 \cdot N_1 \cdot f} \tag{4.27}$$

où  $f$  la fréquence du réseau d'alimentation.

En effet ;

$$U_m = N_1 \cdot \omega \cdot \phi_m \Rightarrow \phi_m = \frac{U_m}{N_1 \cdot \omega}$$

$$\phi_m = \frac{\sqrt{2} \cdot U_1}{2\pi \cdot f \cdot N_1} = \frac{U_1}{4.44 \cdot f \cdot N_1} = cte$$

De ces dernières expressions en découlent que le flux ne dépend pas de la charge sur la tension  $U_1$  est constante. Ceci est une approximation basée sur l'hypothèse que  $U_1 = U_h$  valable seulement pour  $I_2 \leq I_{2n}$ .

Si  $\phi_m$ , on aura alors :

$$\sqrt{2} \cdot \underline{I}_0 \cdot N_1 \cdot \Lambda_h = \sqrt{2} \cdot \Lambda_{h/1} \tag{4.28}$$

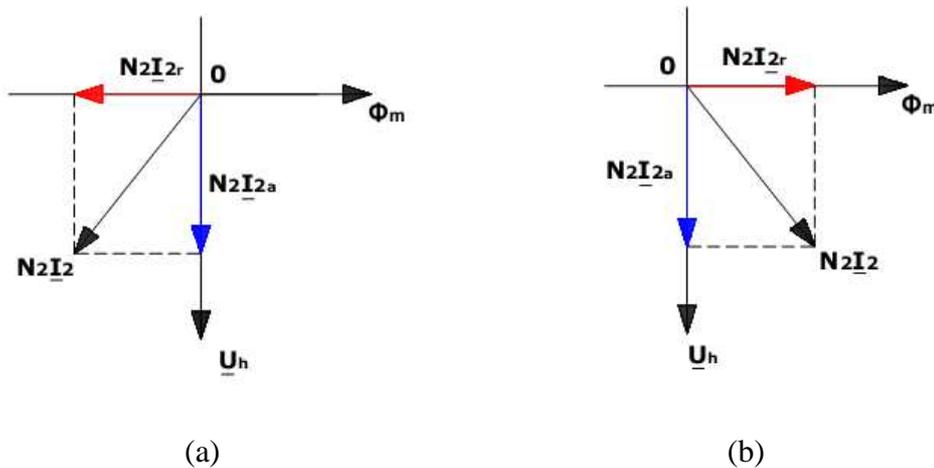
$$\sqrt{2} \cdot \underline{I}_0 \cdot N_1 \cdot \Lambda_h = \sqrt{2} \cdot \Lambda_h (N_1 \cdot \underline{I}_1 + N_2 \cdot \underline{I}_2) \tag{4.29}$$

On aura :

$$N_1 \cdot \underline{I}_0 = (N_1 \cdot \underline{I}_1 + N_2 \cdot \underline{I}_2) \text{ ou} \tag{4.30}$$

$$N_1 \cdot \underline{I}_1 = (N_1 \cdot \underline{I}_0 - N_2 \cdot \underline{I}_2) \tag{4.31}$$

C'est l'équation de la fmm du transformateur. La fmm  $N_2 \cdot \underline{I}_2$  peut diminuer ou renforcer le flux suivant que la charge sera respectivement inductive ou capacitive. Les diagrammes ci-dessus montrent l'influence de la nature de charge sur cette fmm.



**Figure 3.11** : Diagramme de force magnétomotrice d'un transformateur  
 (a) : charge à caractère inductive  
 (b) : charge à caractère capacitive

En divisant l'équation de la fmm par  $N_1$ , on aura :

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + (-\underline{I}_2) \tag{4.32}$$

C'est l'équation du courant d'un transformateur réduit, de ces équations, on constate que :

- La fmm  $N_1 \cdot \underline{I}_1$  a deux composantes :
  - $N_1 \cdot \underline{I}_0$  servant à créer les flux principaux dans le noyau et  $(-N_2 \cdot \underline{I}_2)$  composante de la fmm dans l'enroulement secondaire.
- Toutes variations du courant de charge  $\underline{I}_2$  entraînent une variation du courant primaire par le biais de sa composante  $(-\underline{I}'_2)$  qui est en opposition de phase avec  $\underline{I}_2$ .

### 3.4.2 Composantes des flux

Comme pratiquement tout matériau est conducteur de champ magnétique, il en résulte que à part des flux principaux communs aux deux circuits se fermant dans le noyau, chaque enroulement crée un flux non couplé avec le bobinage homologue appelé flux de fuite que nous indiquerons par l'indice « f ». Ces flux se ferment essentiellement dans l'air.

Les composantes de flux de la figure 4.11 dans le transformateur sont les suivantes :

$\phi_{h1}, \phi_{h2}$  : flux principaux ;

$\phi_{f1}, \phi_{f2}$  : flux de fuite.

En l'absence de saturation, c'est-à-dire  $\mu_{Fe} = cte$ , il y a une proportionnalité entre les flux et la force magnétomotrice (solénation) :

$$\phi_{h1} = \Lambda_h \cdot N_1 \cdot i_1 \quad (4.33)$$

$$\phi_{h2} = \Lambda_h \cdot N_2 \cdot i_2 \quad (4.34)$$

$\Lambda_h$  représente la perméance du circuit magnétique.

Par superposition, on trouve :

Le flux primaire est :

$$\phi_1 = \phi_{h1} + \phi_{h2} + \phi_{f1} \quad (4.35)$$

$$\phi_1 = \phi + \phi_{f1} \quad (4.36)$$

Le flux secondaire s'écrit :

$$\phi_2 = \phi_{h1} + \phi_{h2} + \phi_{f2} \quad (4.37)$$

$$\phi_2 = \phi + \phi_{f2} \quad (4.38)$$

$\phi_1$  et  $\phi_2$  sont les flux résultants couplés respectivement avec le primaire et le secondaire,  $\phi$  le flux mutuel résultant.

### 3.4.3 Equations des inductances

Le flux mutuel résultant  $\phi$  vaut :

$$\phi = \phi_{h1} + \phi_{h2} = \Lambda_h (N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2) \quad (4.39)$$

d'où l'on déduit les flux totalisés à travers les enroulements :

$$\psi_1 = N_1 \cdot \phi_1 = N_1 \cdot \phi_{f1} + N_1 \cdot \phi \quad (4.40)$$

$$\psi_2 = N_2 \cdot \phi_2 = N_2 \cdot \phi_{f2} + N_2 \cdot \phi \quad (4.41)$$

A ces flux correspondent des inductances déterminées.

Les inductances de fuite  $L_{f1}$  et  $L_{f2}$  valent respectivement :

$$L_{f1} = \frac{N_1 \cdot \phi_{f1}}{i_1} = N_1^2 \cdot \Lambda_{f1} \quad (4.42)$$

$$L_{f2} = \frac{N_2 \cdot \phi_{f2}}{i_2} = N_2^2 \cdot \Lambda_{f2} \quad (4.43)$$

Les inductances principales  $L_{h1}$  et  $L_{h2}$  sont :

$$L_{h1} = \frac{N_1 \cdot \phi_{h1}}{i_1} = N_1^2 \cdot \Lambda_{h1} \quad (4.44)$$

$$L_{h2} = \frac{N_2 \cdot \phi_{h2}}{i_2} = N_2^2 \cdot \Lambda_{h2} \quad (4.45)$$

On a donc :

$$\psi_1 = L_{f1} \cdot i_1 + N_1 \cdot \phi \quad (4.46)$$

$$\psi_2 = L_{f2} \cdot i_2 + N_2 \cdot \phi \quad (4.47)$$

### 3.4.4 Schéma équivalent

L'application de la loi d'Ohm généralisée aux circuits primaire et secondaire fournit les relations :

$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + \frac{d\psi_1}{dt} = R_1 \cdot i_1 + L_{f1} \cdot \frac{di_1}{dt} + N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (4.48)$$

$$u_2 = R_2 \cdot i_2 + \frac{d\psi_2}{dt} = R_2 \cdot i_2 + L_{f2} \cdot \frac{di_2}{dt} + N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (4.49)$$

Ces expressions ne diffèrent de celles établies pour le transformateur idéal et que par l'adjonction des termes de chutes de tension dues à la résistance et à l'inductance de fuite des enroulements.

L'adjonction de ces éléments de circuit est effectuée dans la figure suivante.

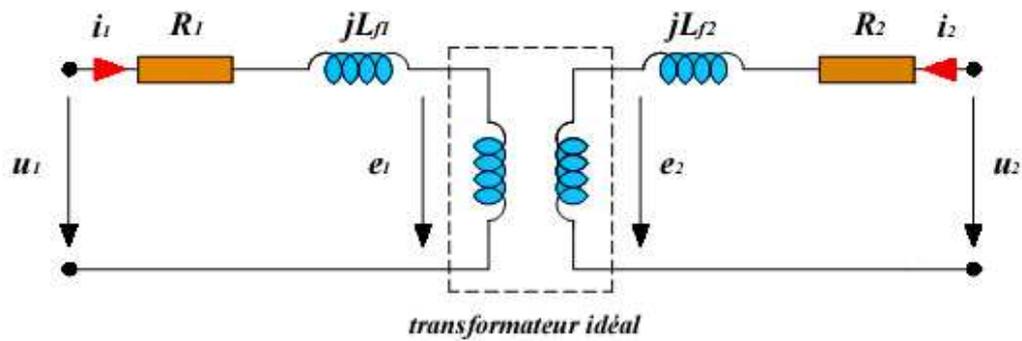


Figure 3.12 : Schéma équivalent d'un transformateur réel

Pour compléter la représentation, il faut introduire l'effet du circuit magnétique.

Selon la relation (4.37):

$$\phi = \phi_{h1} + \phi_{h2} = \Lambda_h (N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2) = \frac{L_{h1}}{N_1^2} ((N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2) = \frac{L_{h1}}{N_1} (i_1 + \frac{N_2}{N_1} \cdot i_2) \tag{4.50}$$

La variation du flux mutuel résultant induit dans le primaire fait naissance la tension :

$$u_h = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} = L_{h1} \cdot \frac{d}{dt} (i_1 + \frac{N_2}{N_1} \cdot i_2) \tag{4.51}$$

La figure qui suit correspond au schéma équivalent d'un transformateur avec introduction de l'effet du circuit magnétique.

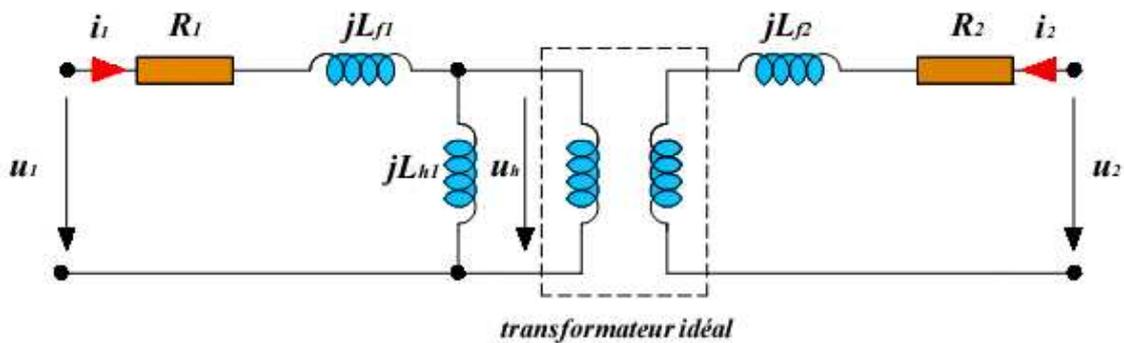


Figure 3.13 : Schéma équivalent d'un transformateur réel avec introduction de l'effet du circuit magnétique

Etant donné que les enroulements primaire et secondaire ont généralement des paramètres différents, c'est-à-dire  $N_1 \neq N_2$  et  $i_1 \neq i_2$ , l'évaluation des paramètres des phénomènes dans un transformateur ainsi que la construction des diagrammes vectoriels deviennent très compliquer. Pour évite ces difficultés alors, on réduit les deux enroulements du transformateur à un même nombre de spires. Généralement, c'est l'enroulement secondaire qui est réduit au primaire. Les grandeurs réduites de l'enroulement secondaire sont désignées par des lettres primes « ' » des valeurs réelles, par exemple  $i_2', u_2', R_2', \dots$ . Toute fois l'opération de réduction ne doit avoir une influence sur le processus énergétique du transformateur, c'est-à-dire les puissances, les déphasages, etc... de l'enroulement secondaire réduit doivent d'être le même pour l'enroulement réel.

Du point de vue théorie des circuits, l'effet du circuit magnétique indiqué sur la figure précédente est équivalent à une inductance  $L_{h1}$  connectée aux bornes du transformateur idéal et parcourue par un courant :

$$i_0 = i_1 + \frac{N_2}{N_1} \cdot i_2 = i_1 + i_2' \tag{4.52}$$

En introduisant les grandeurs secondaires ramenées au primaire :

$$R_2' = \dot{u}^2 \cdot R_2 \tag{4.53}$$

$$L_{f2}' = \dot{u}^2 \cdot L_{f2} \tag{4.54}$$

$$L_{h2}' = \dot{u}^2 \cdot L_{h2} = L_{h1} \tag{4.55}$$

$$u_2' = \dot{u}^2 \cdot u_2 \tag{4.56}$$

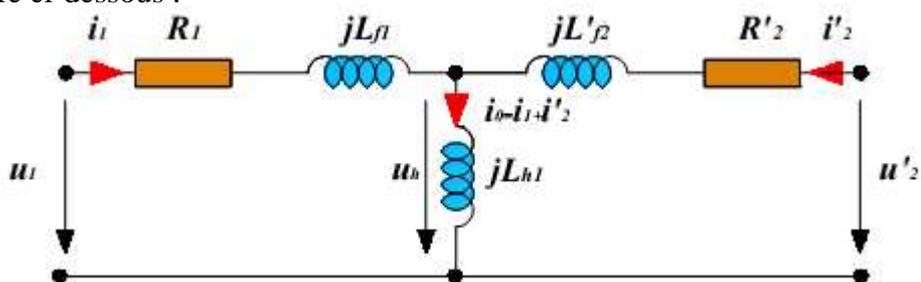
$$i_2' = \frac{i_2}{\dot{u}} \tag{4.57}$$

Les équations de tensions deviennent alors :

$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + L_{f1} \cdot \frac{di_1}{dt} + L_{h1} \cdot \frac{di_0}{dt} \tag{4.58}$$

$$u_2' = R_2' \cdot i_2' + L_{f2}' \cdot \frac{di_2'}{dt} + L_{h1} \cdot \frac{di_0}{dt} \tag{4.59}$$

Ces équations de tensions sont celles du schéma équivalent du transformateur représenté par la figure ci-dessous :

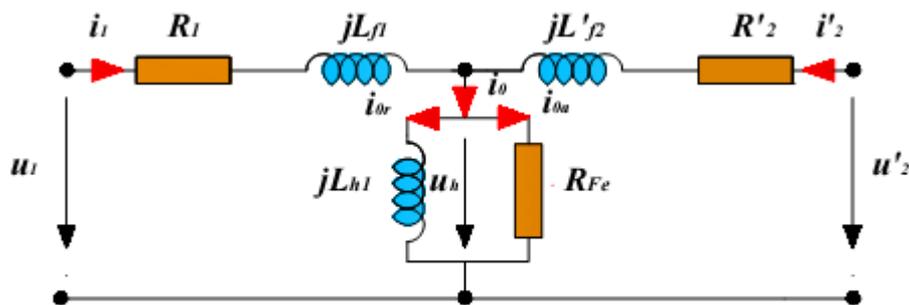


**Figure 3.14 :** Schéma équivalent du transformateur ramené au primaire

On constate que le couplage magnétique du transformateur a été remplacé par un couplage électrique. L'effet magnétique est a été remplacé par la réactance  $X_h$ , le schéma ainsi obtenu est dit en T.

### 3.4.5 Introduction des pertes fer

Comme le flux principal est alternatif, le circuit magnétique du transformateur est sujet à des pertes d'hystérésis et courant de Foucault, ces pertes ne peuvent pas être négligées dans l'étude de fonctionnement en charge pour les transformateurs de faibles puissances (<3 kVA). Le schéma précédent doit être complété par l'adjonction d'une résistance « fer »  $R_{Fe}$  disposée habituellement en parallèle avec  $L_{h1}$ .



**Figure 3.15 :** Schéma équivalent du transformateur ramené au primaire avec considération des pertes fer

La valeur de  $R_{Fe}$  se détermine à partir de la mesure des pertes lors de l'essai à vide. Les composantes  $i_{0a}$  et  $i_{0r}$  circulent respectivement dans l'inductance principale  $L_{h1}$  et la résistance  $R_{Fe}$ .

En effet,

$$i_0 = i_{0a} + i_{0r} \quad (4.60)$$

où :

$i_{0a}$  : courant actif ;

$i_{0r}$  : courant réactif ou courant magnétisant.

Pour les transformateurs de puissances comprises entre 10 et 100 kVA, il est usuel d'étudier leur comportement en charge à partir du schéma équivalent en négligeant la composante  $i_{0a}$  devant  $i_{0r}$  ( $R_{Fe} = \infty$ ).

Pour les transformateurs de puissances encore supérieures, on utilise même un schéma simplifié dans lequel le courant à vide est négligé vis-à-vis du courant  $i_1$ .

### 3.4.6 Inductances propres et mutuelles

Les flux propres du primaire et du secondaire valent respectivement :

$$\phi_{11} = \phi_{h1} + \phi_{f1} \quad (4.61)$$

$$\phi_{22} = \phi_{h2} + \phi_{f2} \quad (4.62)$$

Les expressions de flux totalisés deviennent :

$$\psi_1 = N_1 \cdot \phi_1 = N_1(\phi_{f1} + \phi_{h1}) + N_1 \cdot \phi_{h2} = N_1(\phi_{11} + \phi_{h2}) \quad (4.63)$$

$$\psi_2 = N_2 \cdot \phi_2 = N_2(\phi_{f2} + \phi_{h2}) + N_2 \cdot \phi_{h1} = N_2(\phi_{22} + \phi_{h1}) \quad (4.64)$$

Les inductances propres sont définies comme étant :

$$L_{11} = \frac{N_1 \cdot \phi_{11}}{i_1} = \frac{N_1(\phi_{f1} + \phi_{h1})}{i_1} \quad (4.65)$$

$$L_{22} = \frac{N_2 \cdot \phi_{22}}{i_2} = \frac{N_2(\phi_{f2} + \phi_{h2})}{i_2} \quad (4.66)$$

En d'autre terme :

$$L_{11} = L_{f1} + L_{h1} \quad (4.67)$$

$$L_{22} = L_{f2} + L_{h2} \quad (4.68)$$

De même, on définit les inductances mutuelles comme suit :

$$L_{12} = \frac{N_1 \cdot \phi_{h2}}{i_2} \quad (4.69)$$

$$L_{21} = \frac{N_2 \cdot \phi_{h1}}{i_1} \quad (4.70)$$

Comme

$$\begin{cases} \phi_{h1} = \Lambda_h \cdot N_1 \cdot i_1 \\ \phi_{h2} = \Lambda_h \cdot N_2 \cdot i_2 \end{cases} \quad (4.71)$$

Et en remplaçant  $\phi_{h1}$  et  $\phi_{h2}$  par leurs valeurs dans les relations (4.67) et (4.68), on a alors :

$$L_{12} = L_{21} = \Lambda_h \cdot N_1 \cdot N_2 = M \quad (4.72)$$

On en déduit à partir des relations (4.42) et (4.43) :

$$L_{12} = \frac{L_{h1}}{\ddot{u}} = \ddot{u} \cdot L_{h2} \quad (4.73)$$

On retrouve ainsi les relations classiques des circuits couplés :

$$\psi_1 = L_{11} \cdot i_1 + L_{12} \cdot i_2 \quad (4.74)$$

$$\psi_2 = L_{22} \cdot i_2 + L_{21} \cdot i_1 \quad (4.75)$$

$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} \quad (4.76)$$

$$u_2 = R_2 \cdot i_2 + L_{22} \frac{di_2}{dt} + L_{21} \frac{di_1}{dt} \quad (4.77)$$

### 3.4.7 Equations caractéristiques

Pour le régime stationnaire à tensions sinusoïdales et fréquence constante, les relations (4.74) et (4.75) deviennent en notation complexe :

$$\underline{U}_1 = (R_1 + j\omega L_{11})\underline{I}_1 + j\omega L_{12}\underline{I}_2 \quad (4.78)$$

$$\underline{U}_2 = (R_2 + j\omega L_{22})\underline{I}_2 + j\omega L_{21}\underline{I}_1 \quad (4.79)$$

or

$$L_{12} = \frac{N_2}{N_1} \cdot L_{h1} = \frac{L_{h1}}{\ddot{u}} \quad \text{et} \quad \underline{I}'_2 = \frac{I_2}{\ddot{u}} \quad (4.80)$$

d'où :

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= (R_1 + j\omega L_{11})\underline{I}_1 + j\omega L_{h1}\underline{I}'_2 \\ &= (R_1 + j\omega L_{f1})\underline{I}_1 + j\omega L_{h1}(\underline{I}_1 + \underline{I}'_2) \\ \underline{U}_1 &= (R_1 + jX_{f1})\underline{I}_1 + jX_h \underline{I}_0 \end{aligned} \quad (4.81)$$

$X_{f1}$  représente la réactance de fuite primaire,  $X_h$  la réactance principale et  $I_0$  le courant magnétisant.

On a :

$$X_{f1} = \omega L_{f1} \quad (4.82)$$

$$X_h = \omega L_{h1} \quad (4.83)$$

$$\underline{I}_0 = (\underline{I}_1 + \underline{I}'_2) \quad (4.84)$$

En multipliant par le rapport de transformation  $\dot{u}$  tous les termes de l'équation de tension du secondaire dans la relation (4.77) et en introduisant les grandeurs secondaires rapportées au primaire, il vient :

$$\begin{aligned} \underline{U}'_2 &= (R'_2 + j\omega L'_{22})\underline{I}'_2 + j\omega L_{h1}\underline{I}_1 \\ &= (R'_2 + j\omega L'_{f2})\underline{I}'_2 + j\omega L_{h1}(\underline{I}_1 + \underline{I}'_2) \\ &= (R'_2 + jX'_{f2})\underline{I}'_2 + jX_h\underline{I}_0 \end{aligned}$$

D'où

$$\underline{U}_2 = (R'_2 + jX'_{f2})\underline{I}'_2 + jX_h\underline{I}_0 \tag{4.85}$$

En remplaçant dans la relation (4.78) la valeur de  $jX_h\underline{I}_0$  tirée de la relation (4.83), on obtient finalement :

$$\underline{U}_1 = \underline{U}'_2 + (R_1 + jX_{f1})\underline{I}_1 - (R'_2 + jX'_{f2})\underline{I}'_2 \tag{4.86}$$

Si le secondaire est fermé par une charge d'impédance rapportée  $\underline{Z}'_{ch}$ , on a :

$$\underline{U}'_2 = -\underline{Z}'_{ch}\underline{I}'_2 \tag{4.87}$$

Et la relation (4.84) devient :

$$\underline{U}_1 = (R_1 + jX_{f1})\underline{I}_1 - (R'_2 + jX'_{f2} + \underline{Z}'_{ch})\underline{I}'_2 \tag{4.88}$$

La tension  $\underline{U}_1$  ainsi exprimée n'est rien d'autre que la tension appliquée aux bornes d'entrée du circuit représenté par la figure 4.16.

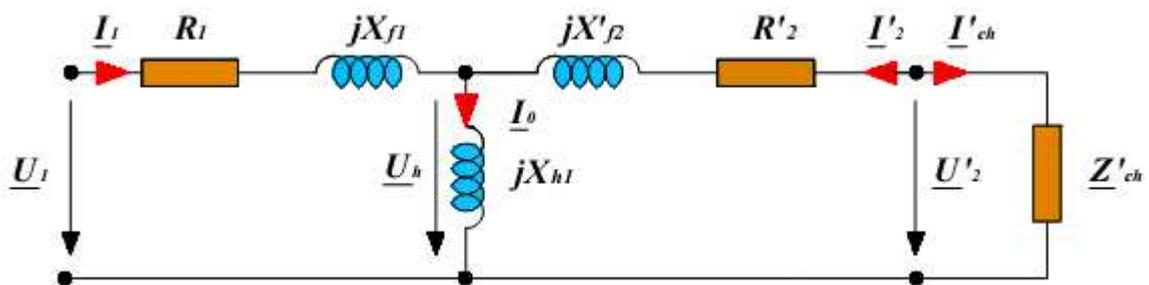


Figure 3.16 : Schéma équivalent d'un transformateur en régime permanent

### 3.4.8 Schéma équivalent transformé

La détermination des tensions et courants correspondant à un cas de charge donné s'effectue aisément en appliquant au circuit précité le théorème de Thévenin.

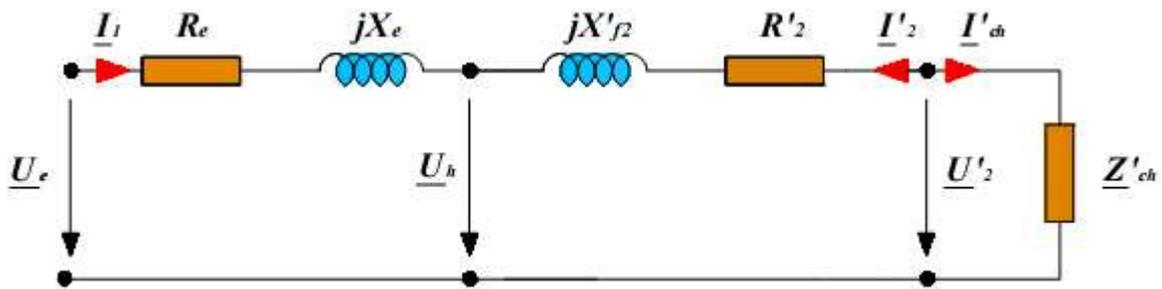
$$\underline{U}_e = \underline{U}_1 \cdot \frac{jX_h}{R_1 + j(X_{f1} + X_h)} = \underline{U}_1 \cdot \frac{jX_h}{R_1 + jX_{11}} \quad (4.89)$$

$$\underline{Z}_e = \frac{jX_h(R_1 + jX_{f1})}{R_1 + jX_{11}} = R_e + jX_e \quad (4.90)$$

avec :

$$X_{11} = X_{f1} + X_h \quad (4.91)$$

Le schéma de la figure 4.16 transformé est représenté à la figure ci-après :



**Figure 3.17 :** Schéma équivalent transformé d'un transformateur en régime permanent

Les grandeurs secondaires rapportées valent :

$$\underline{I}'_{ch} = -\underline{I}'_2 = \frac{\underline{U}_e}{\underline{Z}_e + \underline{Z}'_{ch} + R'_2 + jX'_{f2}} \quad (4.92)$$

$$\underline{U}'_2 = \underline{Z}'_{ch} \cdot \underline{I}'_{ch} \quad (4.93)$$

et le courant primaire vaut :

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 - \underline{I}'_2 = \underline{I}_0 + \underline{I}'_{ch} \quad (4.94)$$

avec :

$$\underline{I}_0 = \frac{\underline{U}_e - \underline{Z}_e \cdot \underline{I}'_{ch}}{jX_h} \quad (4.95)$$

### 3.5 Marche à vide

On dit qu'un transformateur fonctionne à vide si le secondaire est ouvert :

$$I_2 = 0 \text{ et } Z_{ch} = \infty$$

Le schéma équivalent d'un transformateur marchant à vide représenté à la figure 4.9 est alors comme suit :

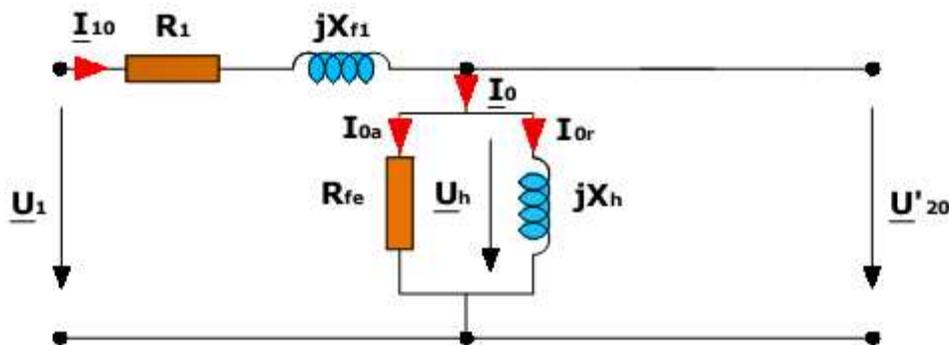


Figure 3.18 : Schéma équivalent d'un transformateur fonctionnant à vide

D'après ce schéma, on constate que  $I_0 = I_{10}$  et  $U'_h = U'_2$ .

$I_0$  est dit courant à vide et est déterminé par l'impédance à vide :

$$\underline{Z}_0 = R_1 + jX_{f1} + j \frac{X_h \cdot R_{Fe}}{R_{Fe} + jX_h} \tag{4.96}$$

Pour le transformateur industriel plus de 5kVA, on peut adopter la valeur approchée suivante :

$$\underline{Z}_0 = R_1 + j(X_{f1} + X_h) = R_1 + jX_{11} \tag{4.97}$$

Le courant à vide fourni est :

$$\underline{I}_{10} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_0} = \frac{\underline{U}_1}{R_1 + jX_{f1} + j \frac{X_h \cdot R_{Fe}}{R_{Fe} + jX_h}} \approx \frac{\underline{U}_1}{R_1 + jX_{11}} \tag{4.98}$$

Comme  $X_h \gg X_{f1}, R_1$ , quelque fois on adopte une autre expression de la valeur approchée de  $\underline{I}_{10}$ .

$$\underline{I}_{10} = \frac{\underline{U}_1}{jX_h} \tag{4.99}$$

Le courant à vide comporte une composante réactive destinée essentiellement à l'excitation du circuit magnétique (courant magnétisant) et une composante active correspondant aux pertes à vide (pertes ohmiques à vide dans l'enroulement primaire et pertes fer).

Le courant à vide étant très faible de même que les valeurs de  $R_1$  et  $X_{f1}$ , la tension  $\underline{U}_h$  est pratiquement égale à  $\underline{U}_1$  à vide.

En effet :

$$\underline{U}_h = \underline{U}_1 - (R_1 + jX_{f1})\underline{I}_{10} \quad (4.100)$$

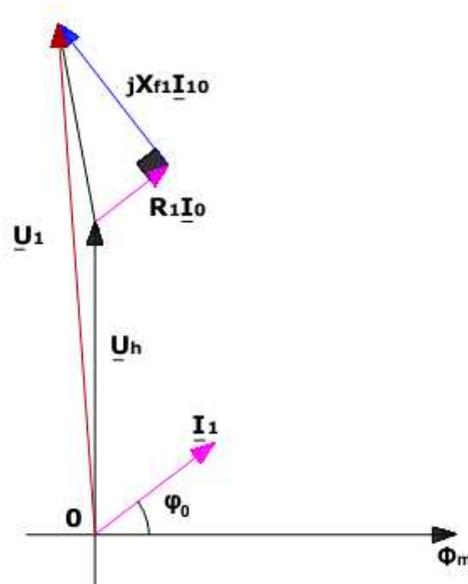
$$\underline{U}_h = \underline{U}'_{20} = \underline{U}_1 \quad (4.101)$$

d'où

$$U_{20} = \frac{U_1}{\ddot{u}} \quad (4.102)$$

Le rapport de tensions à vide est égal au rapport de transformation.

### 3.5.1 Diagramme vectoriel



**Figure 3.19 :** Diagramme vectoriel d'un transformateur fonctionnant à vide

Ainsi on peut utiliser l'essai à vide pour déterminer l'impédance à vide et les paramètres caractéristiques de la branche magnétisante du schéma équivalent en considérant comme si le courant à vide était sinusoïdal.

La puissance consommée à vide détermine les pertes à vide :

$$P_0 = R_1 \cdot I_{10}^2 + R_{Fe} \cdot I_{0a}^2 \quad (4.103)$$

$$P_0 = R_1 \cdot I_{10}^2 + P_{Fe} \quad (4.104)$$

Mais comme  $I_{10}$  est faible,  $R_1 \cdot I_{10}^2 \ll P_{Fe}$ , c'est pourquoi on admet qu'à vide la puissance consommée représente les pertes fer, c'est-à-dire :

$$P_0 \approx P_{Fe} \tag{4.105}$$

Au cours de cet essai, on peut relever les caractéristiques suivantes :

$U_{20} = f(I_0)$ ,  $P_{Fe} = f(U_1)$  et déterminer  $R_1, R_2, \dot{u}, X_h, R_{Fe}$  et  $\cos \varphi_0$ .

### 3.6 Fonctionnement en court-circuit

On dit qu'un transformateur fonctionne en court-circuit lorsque le secondaire est fermé sur lui-même. Dans ce cas  $U_2 = U_2' = 0$  et  $Z_{ch} = 0$ .

Le schéma de principe est donné comme suit :

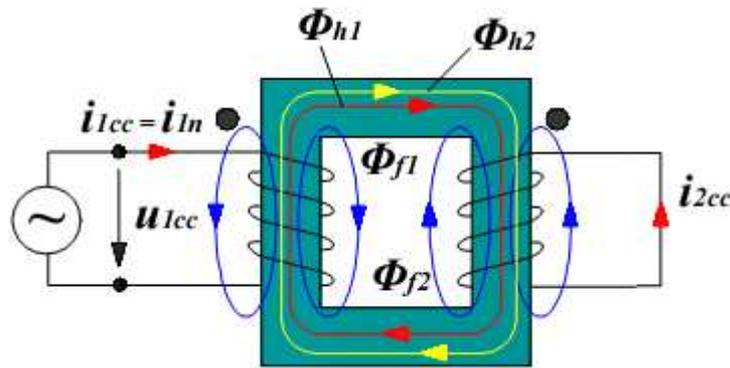


Figure 3.20 : Schéma de principe d'un transformateur en court-circuit

Le schéma équivalent correspondant à ce fonctionnement est le suivant :

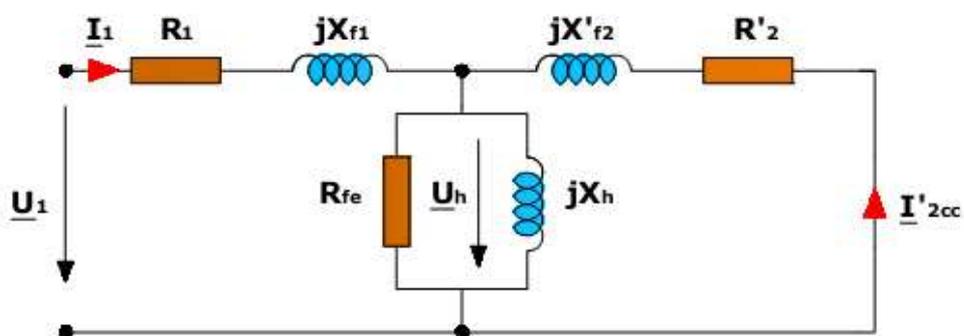


Figure 3.21 : Schéma équivalent d'un transformateur en court-circuit

L'application d'une tension nominale en essai en court-circuit est inadmissible car cela entraînerait des courants  $I_{1cc}$  et  $I_{2cc}$  de l'ordre 25 fois de la valeur nominale. Aussi au court de cet essai utilise-t-on une tension de court-circuit normalisée c'est-à-dire la tension réduite qui, appliquée au primaire, provoquerait un courant nominal. La tension de court-circuit normalisée est comprise entre 3 à 15% de  $U_{1n}$ .

Il s'ensuit que le courant  $I_0$  qui était déjà très faible à tension nominale devient parfaitement négligeable dans l'essai en court-circuit normalisé.

$$I_{0cc} \approx 0 \Rightarrow \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = 0 \tag{4.106}$$

et l'équation de tension devient :

$$\underline{U}_{1cc} = [(R_1 + R'_2) + j(X_{f1} + X'_{f2})] \cdot \underline{I}_{1n} \tag{4.107}$$

avec :

$$\underline{I}_{1n} = \underline{I}_{1cc}$$

ce qui correspond au schéma équivalent suivant :

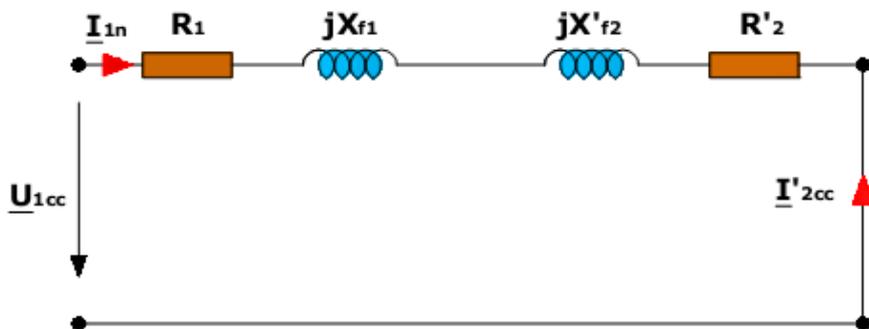


Figure 3.22 : Schéma équivalent réduit d'un transformateur en court-circuit

Le schéma équivalent peut encore être réduit, et nous donne le nouveau schéma ci-dessous :

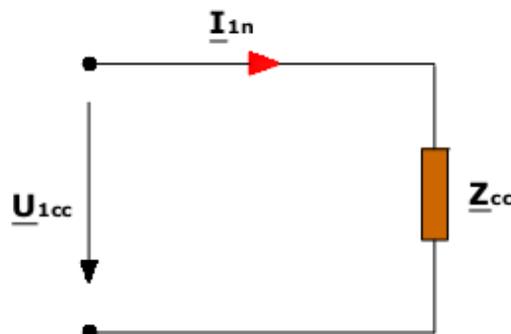


Figure 3.23 : Schéma équivalent d'un transformateur en court-circuit figurant son impédance

On a donc  $\underline{I}_{2cc} = -\underline{I}_{1cc}$  avec  $\underline{I}_{1cc} = \underline{I}_{1n}$  et  $\underline{I}_{2cc} = \dot{u} \cdot \underline{I}_{1cc}$

avec :

$$\underline{I}_{1cc} = \frac{\underline{U}_{1cc}}{(R_1 + R_2') + j(X_{f1} + X'_{f2})} \tag{4.108}$$

On définit l'impédance de court-circuit du transformateur par :

$$\underline{Z}_{cc} = \frac{\underline{U}_{1cc}}{\underline{I}_{1cc}} \tag{4.109}$$

En effet ;

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{cc} &= (R_1 + R_2') + j(X_{f1} + X'_{f2}) \\ &= R_{cc} + jX_{cc} \end{aligned}$$

d'où :

$$\underline{Z}_{cc} = R_{cc} + jX_{cc} \tag{4.110}$$

avec :

$$R_{cc} = Z_{cc} \cdot \cos \varphi_{cc} \tag{4.111}$$

$$X_{cc} = Z_{cc} \cdot \sin \varphi_{cc} \tag{4.112}$$

$R_{cc}, X_{cc}$  sont appelées respectivement résistance et réactance de court-circuit.

### 3.6.1 Diagramme vectoriel

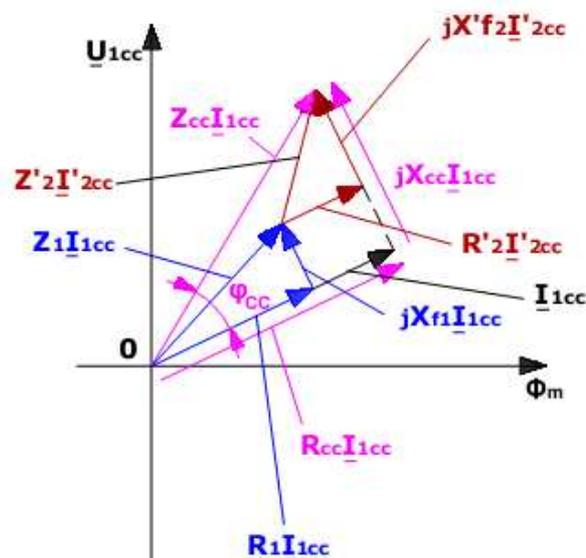


Figure 3.24 : Diagramme de Kapp d'un transformateur en court-circuit

Ainsi donc l'essai en court-circuit permet de mesurer l'impédance de court-circuit d'un transformateur, c'est-à-dire son impédance interne.

Comme en essai en court-circuit, le flux principal ne constitue que quelque pourcent de sa valeur nominale, les pertes magnétiques dues à ce flux peuvent être négligées.

Par conséquent, on peut considérer que la puissance consommée en essai en court-circuit est utilisée pour compenser les pertes Joule dans les enroulements du transformateur.

$$P_{cc} = R_1 \cdot I_{1cc}^2 + R_2' \cdot I_{1cc}^2 \quad (4.113)$$

$$P_{cc} = R_{cc} \cdot I_{1cc}^2 \quad (4.114)$$

Normalement, les valeurs des paramètres en court-circuit  $R_{cc}$ ,  $X_{cc}$ ,  $Z_{cc}$ ,  $P_{cc}$ ,  $U_{1cc}$  et  $\cos \varphi_{cc}$  doivent être ramener à la température de service des enroulements, c'est-à-dire à 75°C.

Ainsi, on aura :

$$R_{cc75^\circ C} = R_{cc} [1 + \alpha(75^\circ C - \theta_1)] \quad (4.115)$$

$$Z_{cc75^\circ C} = \sqrt{R_{cc75^\circ C}^2 + X_{cc75^\circ C}^2} \quad (4.116)$$

$$\cos \varphi_{cc75^\circ C} = \frac{R_{cc75^\circ C}}{Z_{cc75^\circ C}} \quad (4.117)$$

avec :

$R_{cc75^\circ C}$  : Résistance de court-circuit à la température  $\theta_1$

$\alpha$  : Coefficient de température, pour le cuivre  $\alpha = 0.004$

### 3.7 Fonctionnement en charge

L'hypothèse de Kapp consiste à négliger la composante  $I_0$  dans l'étude de fonctionnement en charge, c'est-à-dire d'écrire les équations caractéristiques sous la forme :

$$\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = 0 \quad (4.118)$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}'_2 + \underline{Z}_{cc} \cdot \underline{I}_1 \quad (4.119)$$

$$\underline{U}'_2 = \underline{Z}'_{ch} \cdot \underline{I}_1 \quad (4.120)$$

On a alors le schéma équivalent suivant :

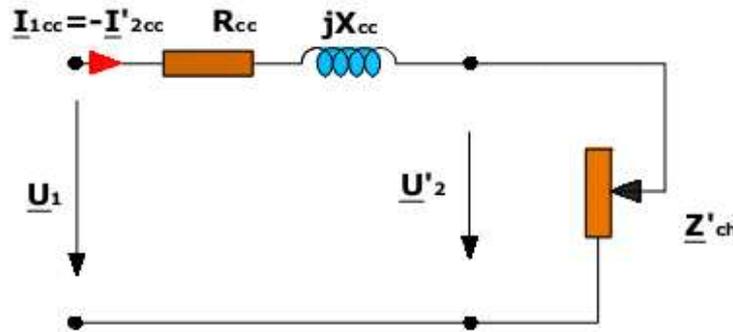


Figure 3.25 : Schéma équivalent d'un transformateur en charge

Le diagramme vectoriel correspondant appelé diagramme de Kapp fait apparaître les trois angles fondamentaux de Kapp représentant les chutes internes du transformateur.

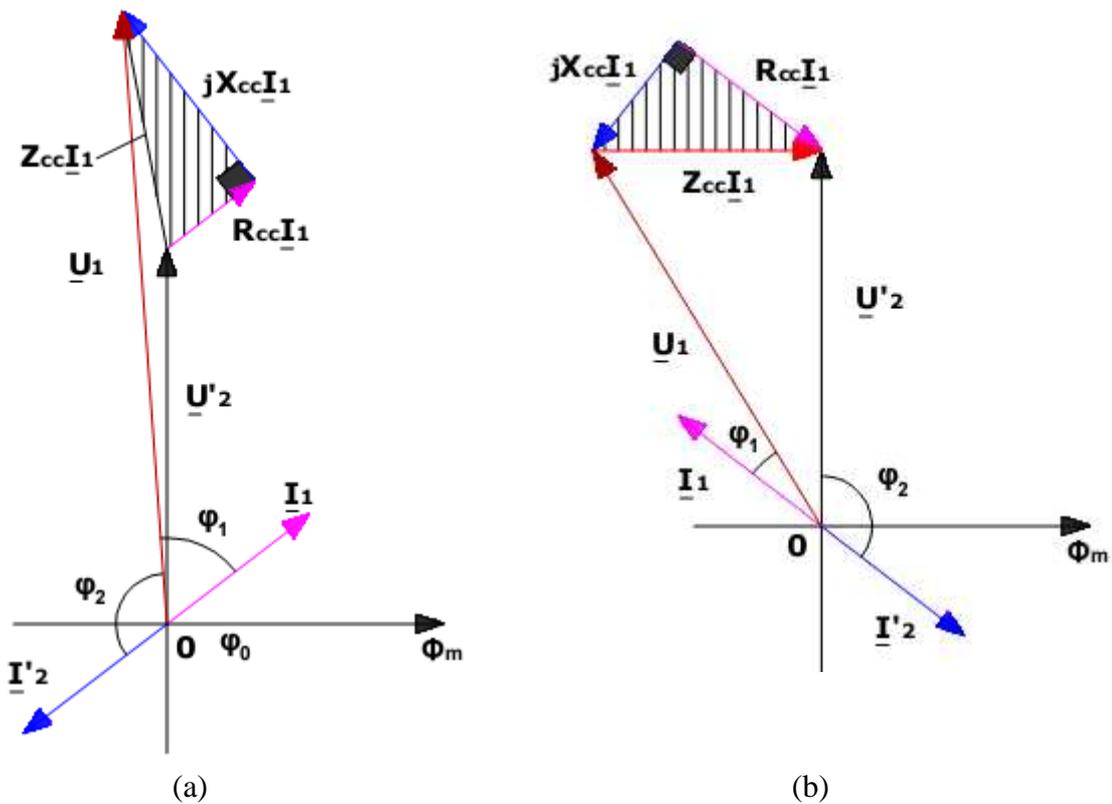


Figure 4.26 : Diagrammes de Kapp d'un transformateur en charge

- (a) : pour une charge à caractère inductif R, L
- (b) : pour une charge à caractère capacitif R, C

On voit donc qu'un transformateur alimenté au primaire par une tension constante délivre au secondaire une tension variable avec la charge. L'écart de la tension à vide  $U_{20}$  par rapport à la tension de charge dépend de l'impédance interne de court-circuit du transformateur et de la nature de la charge.

A  $\underline{U}_1$  et  $\underline{I}_1$  constants, l'extrémité de la tension  $\underline{U}'_2$  décrit un cercle de rayon égal à  $\underline{Z}_{cc} \cdot \underline{I}_1$  et dont le centre est l'extrémité de  $\underline{U}_1$ .

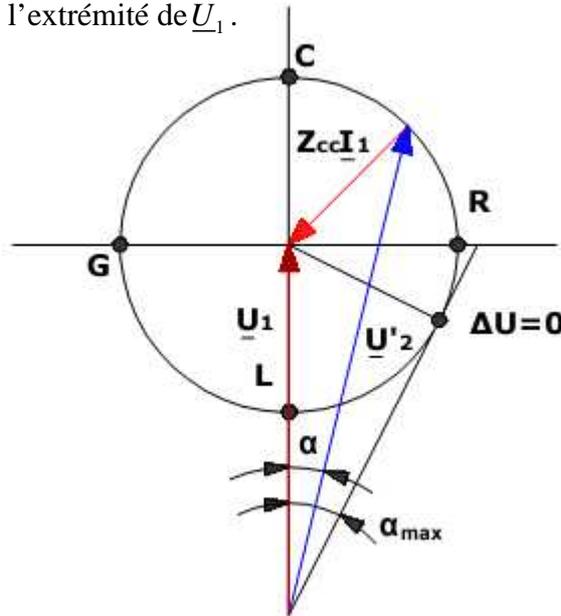


Figure 3.27 : Diagramme de cercle

où :

- R : correspond à une charge active pure ;
- L : correspond à une charge inductive pure ;
- C : correspond à une charge capacitive pure ;
- G : correspond à un secondaire constitué par un générateur.

La variation de la tension est définie en pourcent comme suit :

$$\Delta U = \frac{|\underline{U}_{20}| - |\underline{U}_2|}{|\underline{U}_{20}|} \cdot 100 = \frac{|\underline{U}_1| - |\underline{U}'_2|}{|\underline{U}_1|} \cdot 100 \tag{4.121}$$

Une valeur négative de  $\Delta U$  correspond à une augmentation de la tension en charge par rapport à la tension à vide et une valeur positive correspond une diminution.

La variation  $\Delta U$  en fonction de l'angle de déphasage entre  $\underline{I}'_{ch} = \underline{I}_1$  et  $\underline{I}_2$  est représenté par la courbe suivante :

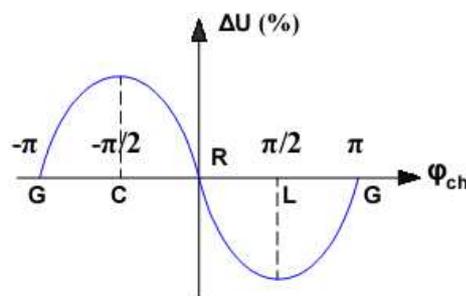


Figure 3.28 : Variation de la chute de tension en fonction de l'angle de déphasage  $\varphi_{ch}$

### 3.8 Calcul approché de la variation de la tension

La valeur la plus élevée possible de l'angle de déphasage entre  $\underline{U}_1$  et  $\underline{U}_2$  est obtenue pour  $\underline{U}_{ch} = 0$  ou  $\pi$ . Dans ce cas, on a :

$$\sin \alpha_{\max} = \frac{|Z_{cc} \cdot I_1|}{|\underline{U}_1|} \tag{4.122}$$

Pour la condition de charge nominale :

$$\begin{aligned} \sin \alpha_{\max} &= \frac{|Z_{cc} \cdot I_1|}{|\underline{U}_1|} = u_{cc} \tag{4.123} \\ &= \frac{|U_{ccn}|}{|\underline{U}_1|} = u_{cc} = 0.15 \end{aligned}$$

$$\sin \alpha_{\max} = 0.15$$

d'où, on tire :

$$\alpha_{\max} = 8.63^\circ$$

Pour une tension de court-circuit de 15% limite supérieure usuelle,  $\alpha_{\max} = 8.63^\circ$ . L'angle  $\alpha_{\max}$  étant faible, on peut confondre le module de  $\underline{U}_1$  avec sa projection sur la direction de  $\underline{U}'_2$ .

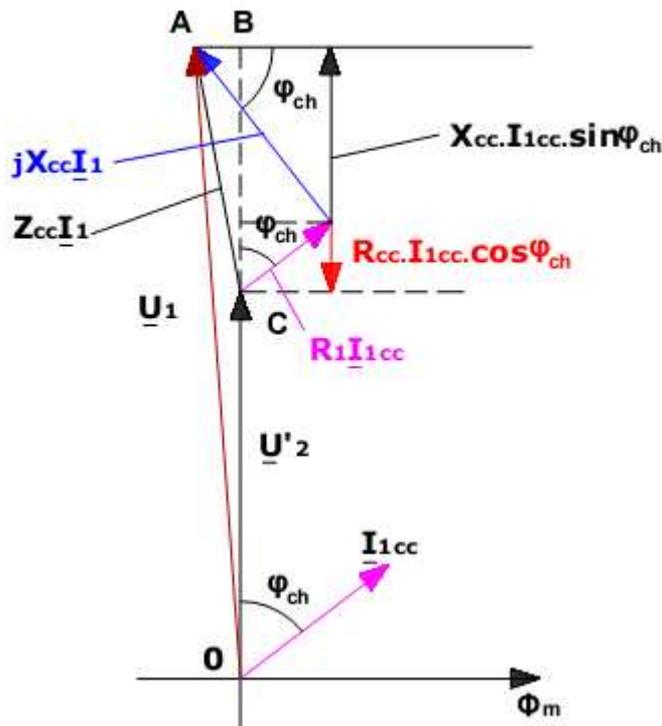


Figure 3.29 : Détermination graphique de la chute de tension

L'écart entre  $\underline{U}_1$  et  $\underline{U}_1 \cdot \cos \alpha_{\max}$  est égal à  $1 - \cos \alpha_{\max} = 0.011$  soit 1.1%, on obtient alors :

$$BC = R_{cc} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{ch} + X_{cc} \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_{ch} \approx \Delta U \quad (4.124)$$

En posant :

$$R_{cc} \cdot I_1 = U_{cca} \quad (4.125)$$

$$X_{cc} \cdot I_1 = U_{ccr} \quad (4.126)$$

avec

$U_{cca}$  : composante active de  $U_{cc}$  ;

$U_{ccr}$  : composante active de  $U_{cc}$ .

d'où :

$$\Delta U \approx U_{cca} \cdot \cos \varphi_{ch} + U_{ccr} \cdot \sin \varphi_{ch} \quad (4.127)$$

$\overline{BC}$  peut être considéré comme étant égal à  $\Delta U$  si une grande précision n'est pas demandée. Dans le cas contraire, on doit prendre en compte le triangle  $OAB$  pour le calcul de  $\Delta U$ . Dans ce cas, on aura :

$$\overline{OA}^2 = \overline{OB}^2 + \overline{AB}^2 = (\overline{OC} + \overline{CB})^2 + \overline{AB}^2 \quad (4.128)$$

avec :

$$\overline{OA} = U_1 ; \quad (4.129)$$

$$\overline{OC} = U_2' \text{ et ;} \quad (4.130)$$

$$\overline{AB} = I_1 \cdot X_{cc} \cdot \cos \varphi_{ch} - I_1 \cdot R_{cc} \cdot \sin \varphi_{ch} \quad (4.131)$$

En remplaçant  $\overline{OA}$  et  $\overline{OC}$  par leurs valeurs dans la relation (4.126), on aura :

$$U_1^2 = (U_2' + \overline{CB})^2 + \overline{AB}^2 \quad (4.132)$$

Tirons  $U_2'$  à partir de la relation précédente, il vient :

$$\begin{aligned} U_2' + \overline{CB} &= \sqrt{U_1^2 - \overline{AB}^2} \\ &= \sqrt{U_1^2 \left( 1 - \frac{\overline{AB}^2}{U_1^2} \right)} \end{aligned}$$

$$= U_1 \left( 1 - \frac{\overline{AB}^2}{U_1^2} \right)^{1/2}$$

Finalement, on trouve :

$$U_2' = U_1 \left( 1 - \frac{\overline{AB}^2}{U_1^2} \right)^{1/2} \quad (4.133)$$

Comme  $\overline{AB} \ll U_1$ , on peut limité le développement de la racine carrée en binôme à ses deux premiers termes, l'expression de  $U_2'$  devient alors :

$$U_2' = U_1 \left( 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{\overline{AB}^2}{U_1^2} \right) - \overline{CB}$$

$$U_2' = U_1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{\overline{AB}^2}{U_1} - \overline{CB} \quad (4.134)$$

Faisons sortir de cette nouvelle expression de  $U_2'$  la chute de tension  $\Delta U$  :

$$\Delta U = U_1 - U_2' = \overline{CB} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\overline{AB}^2}{U_1} \quad (4.135)$$

En remplaçant par leurs expressions respectives  $\overline{CB}$  et  $\overline{AB}$ , l'expression de la chute de tension  $\Delta U$  devient :

$$\Delta U = R_{cc} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{ch} + X_{cc} \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_{ch} + \frac{(X_{cc} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{ch} - R_{cc} \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_{ch})^2}{2U_1} \quad (4.136)$$

Généralement, le dernier terme est faible devant les deux premiers, lorsqu'une précision n'est pas indispensable, on peut le négliger.

Pour une charge différente de la nominale déterminée par le coefficient de charge

$$k_{ch} = \frac{I_2}{I_{2n}} \quad (4.137)$$

La chute de tension est proportionnelle à  $k_{ch}$  ; c'est-à-dire :

$$\Delta U_{k_{ch}} = k_{ch} \cdot \Delta U_n \quad (4.138)$$

### 3.9 Pertes et rendement dans un transformateur

Les pertes dans le transformateur peuvent être classées en deux groupes :

- les pertes électriques (les pertes cuivre dans les enroulements primaire et secondaire) ;
- les pertes magnétiques (pertes dans le circuit magnétique).

Les pertes électriques sont dues à l'échauffement des conducteurs au passage des courants :

$$P_{cc} = P_e = P_{e1} + P_{e2} = R_1 \cdot I_{1n}^2 + R_2 \cdot I_{2n}^2 \quad (4.139)$$

Ces pertes peuvent être déterminées au cours de l'essai en court-circuit normalisé pour des courants différents de courants nominaux, alors on aura :

$$P_{cc} = k_{ch}^2 \cdot P_{ccn} \quad (4.140)$$

avec :

$k_{ch}$  : le coefficient de charge

Les pertes électriques sont dites variables car elles dépendent de la charge.

Les pertes magnétiques sont composées de pertes par hystérésis et par courant de Foucault.

$$P_m = P_H + P_{CF} \quad (4.141)$$

Les pertes par hystérésis sont proportionnelles à la fréquence, c'est-à-dire  $P_H \equiv f$  et celle par courant de Foucault  $P_{CF} \equiv f^2$ . Les pertes magnétiques sont considérées comme étant d'une part, proportionnelles à la fréquence à la puissance et d'autre part, au carré de l'induction et au carré de la tension d'alimentation.

$$P_m \equiv f^{1.3}, P_m \equiv B^2 \text{ et } P_m \equiv U^2$$

Pour  $U_1$  constante, les pertes magnétiques sont constantes, c'est-à-dire ne dépendent pas de la charge.

Les courbes des pertes peuvent être représentées comme suit :

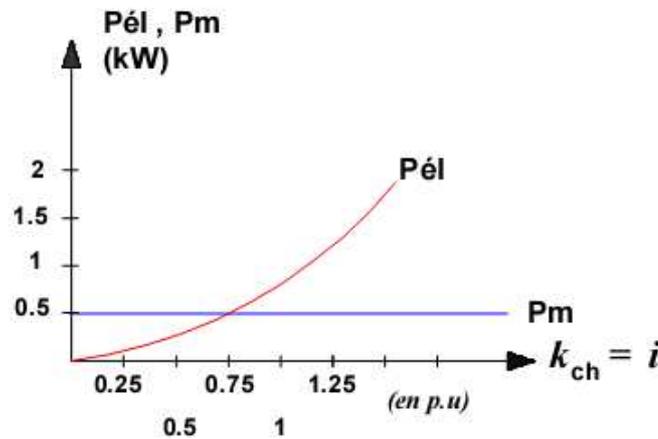


Figure 3.30 : Courbes des pertes

Au moment de la conception d'un transformateur, les pertes magnétiques sont calculées à partir de pertes spécifiques (déterminées expérimentalement pour chaque marque de l'acier avec duquel on confectionne le circuit magnétique) suivant la relation suivante :

$$P_m = P_0 \cdot B_m^\alpha \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^\beta \cdot G \quad (4.142)$$

où :

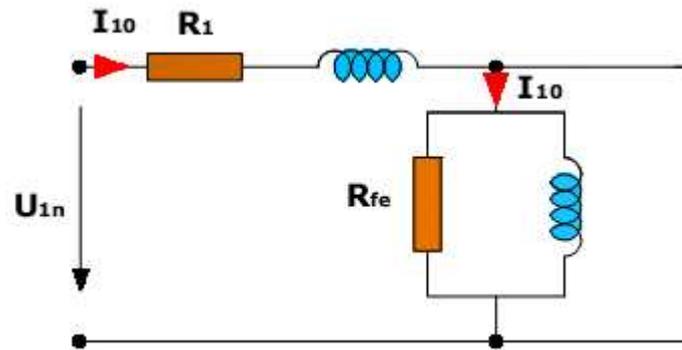
- $P_0$  : perte par kg de fer exprimée en Watt, pour des valeurs de l'induction égales à 1, 1.5 et 1.7 T ;  $P_0$  prend les valeurs 1, 1.5 et 1.7.
- $\alpha$  et  $\beta$  : exposant dépendant de leur base, c'est-à-dire de  $B$  et  $f$ ,  $B = f(f)$  et  $\alpha = f(\beta)$ .
- $G$  : masse du noyau magnétique exprimée en Kg.

Pour simplifier le calcul, on adopte les valeurs moyennes de  $B = 1.2T$ , on prend  $\alpha = 2$ ,  $\beta = 1.3$  et  $f = 50Hz$ .

L'expression des pertes magnétiques devient :

$$P_m = P_0 \cdot B_m^2 \cdot G \quad (4.143)$$

Pour un transformateur existant, les pertes magnétiques sont déterminées au cours de l'essai à vide à tension nominale.



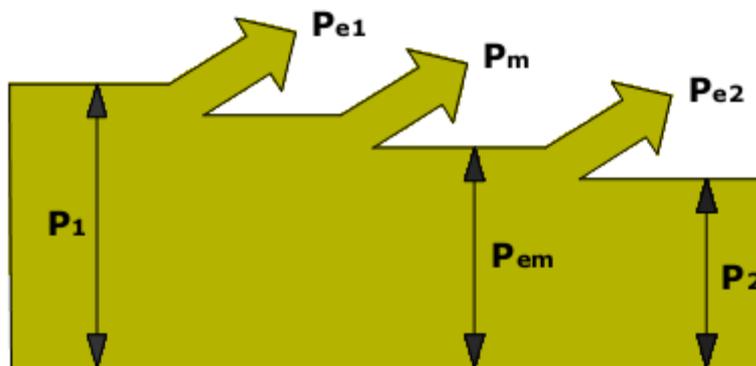
**Figure 3.31** : Schéma équivalent d'un transformateur à vide pour le calcul des pertes magnétiques

$$P_0 = R_1 \cdot I_{10}^2 + R_{fe} \cdot I_{10}^2 \quad (4.144)$$

Ainsi, on tire les pertes magnétiques :

$$P_m = P_0 - R_1 \cdot I_{10}^2 \quad (4.145)$$

Ainsi les puissances et pertes mises en jeu au cours de fonctionnement en charge d'un transformateur peuvent être représentées par le diagramme énergétique suivant :



**Figure 3.32** : Bilan de puissance d'un transformateur

Avec :

- $P_1$  : puissance absorbée au réseau ;
- $P_{e1}$  : perte cuivre dans l'enroulement primaire ;
- $P_m$  : pertes magnétiques dans le circuit magnétique ;
- $P_{em}$  : puissance électromagnétique ;
- $P_{e2}$  : perte électrique dans l'enroulement secondaire ;
- $P_2$  : puissance fournie à la charge.

Le rendement du transformateur est exprimé par l'expression :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum P_{ertes}} \quad (4.146)$$

avec

$$\sum P_{ertes} = P_{0n} + k_{ch}^2 \cdot P_{ccn} \quad (4.147)$$

où

$$P_{0n} = P_m \quad \text{et} \quad P_{cc} = P_{e1} + P_{e2}$$

Parfois, on l'exprime en pourcentage :

$$\eta(\%) = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \quad (4.148)$$

En remplaçant par leurs expressions respectives  $P_{0n}$  et  $P_{ccn}$  dans l'expression de la somme des pertes de la relation (4.143), l'expression du rendement aura la forme suivante :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{0n} + k_{ch}^2 \cdot P_{ccn}} \quad (4.149)$$

En remplaçant par :

$$P_2 = k_{ch} \cdot S_n \cdot \cos \varphi_{ch}$$

Il s'ensuit :

$$\eta = \frac{k_{ch} \cdot S_n \cdot \cos \varphi_{ch}}{k_{ch} \cdot S_n \cdot \cos \varphi_{ch} + P_{0n} + k_{ch}^2 \cdot P_{ccn}} \quad (4.150)$$

L'analyse de cette dernière expression montre que le rendement du transformateur dépend aussi bien de  $k_{ch}$  que de  $\cos \varphi_{ch}$ .

Pour un facteur de puissance  $\cos \varphi_{ch}$  donné, on peut déterminer la valeur de  $k_{ch}$  pour laquelle le rendement est maximal.

Pour cela, il suffit de dériver le rendement par rapport à  $k_{ch}$  et on l'égalise à zéro.

$$\eta' = \frac{S_n \cdot \cos \varphi_{ch} (k_{ch} \cdot S_n \cdot \cos \varphi_{ch} + P_{0n} + k_{ch}^2 \cdot P_{ccn}) - [(S_n \cdot \cos \varphi_{ch} + 2k_{ch} \cdot P_{ccn}) \cdot k_{ch} \cdot S_n \cdot \cos \varphi_{ch}]}{(k_{ch} \cdot S_n \cdot \cos \varphi_{ch} + P_{0n} + k_{ch}^2 \cdot P_{ccn})^2}$$

$$\eta' = \frac{S_n \cdot \cos \varphi_{ch} (P_{0n} - k_{ch}^2 \cdot P_{ccn})}{(k_{ch} \cdot S_n \cdot \cos \varphi_{ch} + P_{0n} + k_{ch}^2 \cdot P_{ccn})^2}$$

$$\eta' = 0 \Leftrightarrow P_{0n} - k_{ch}^2 \cdot P_{ccn} = 0$$

$$P_{0n} = k_{ch}^2 \cdot P_{ccn}$$

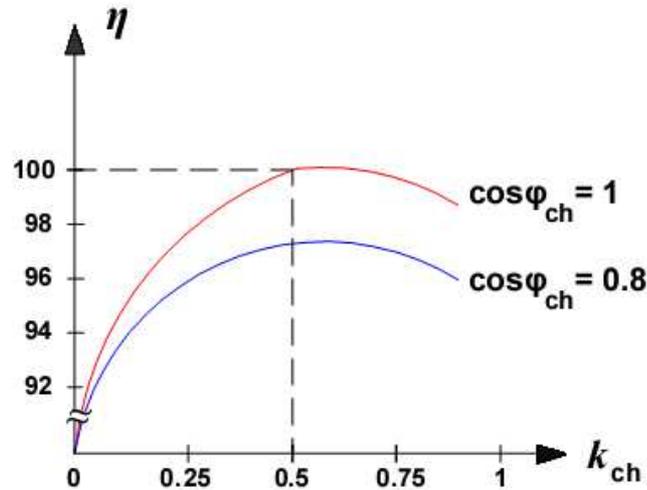
Finalement, on a :

$$k_{ch}' = \sqrt{\frac{P_{0n}}{P_{ccn}}} \quad (4.151)$$

On en conclut que le rendement maximal pour une charge pour laquelle les pertes variables sont égales aux pertes fixes ( $P_{0n} = P_{ccn}$ ).

D'habitude, les transformateurs sont dimensionnés pour un rendement maximal à  $k_{ch_{max}} = 0,45 - 0,65$ . En remplaçant  $k_{ch}$  par  $k_{ch}'$  dans l'expression de  $\eta$ , on aura :

$$\eta_{max} = \frac{k_{ch}' \cdot S_n \cdot \cos \varphi_{ch}}{k_{ch}' \cdot S_n \cdot \cos \varphi_{ch} + 2P_{0n}} \quad (4.152)$$



**Figure 3.33 :** Courbes des rendements

Dans les conditions d'exploitation, on détermine le rendement souvent à partir de la quantité d'énergie fournie pendant une année et de la quantité d'énergie consommée pendant cette période.

$$\eta = \frac{W_2}{W_1} \quad (4.153)$$

avec :

- $W_2$  : énergie fournie par le transformateur ;
- $W_1$  : énergie consommée par le transformateur.

Cette dernière expression caractérise l'efficacité de l'exploitation du transformateur.

### 3.10 Calcul du rendement

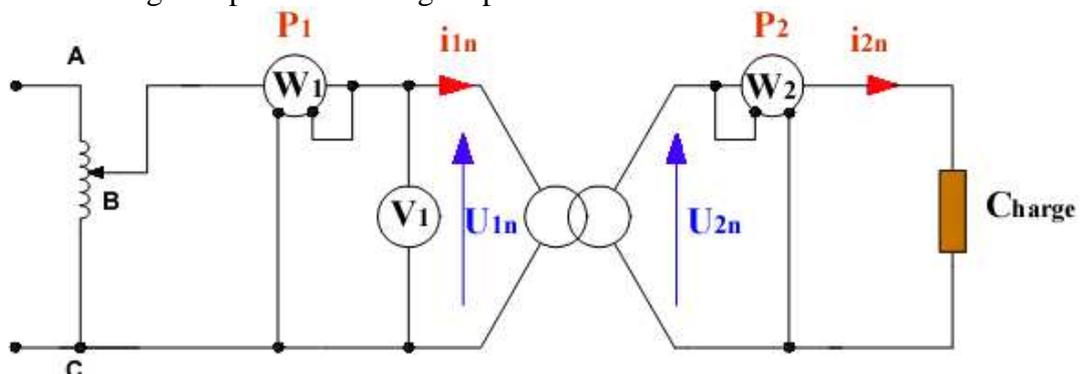
Pour la détermination du rendement d'un tel transformateur, il y a deux méthodes, à savoir :

- La mesure directe ;
- La mesure des pertes séparées.

#### 3.10.1 Mesure directe

Cette méthode consiste à mesurer les puissances absorbée et fournie par le transformateur, pour cela, il faut deux wattmètres, le premier qu'on va baptiser  $W_1$  mesure la puissance absorbée  $P_1$  au réseau. Le second mesure celle qu'on a récupérée au secondaire,  $P_2$ .

Le schéma de montage est présenté à la figure précédente.



**Figure 3.34** : Schéma de montage d'un essai en charge en utilisant deux wattmètres

Le rendement est le rapport entre les valeurs données par les deux wattmètres, soit :

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

#### 3.10.2 La mesure des pertes séparées

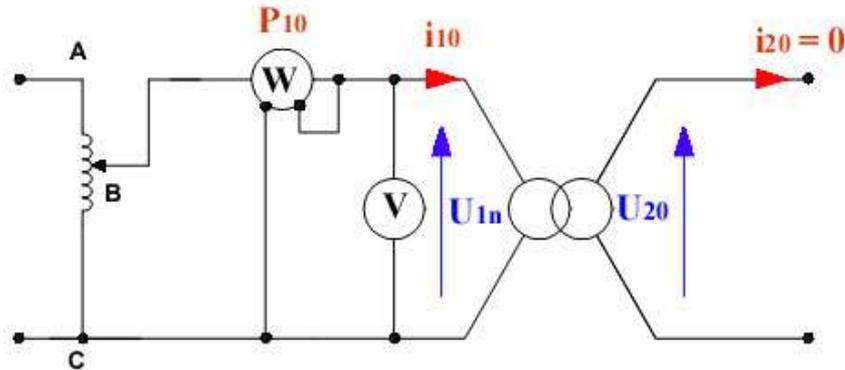
Cette deuxième méthode consiste à évaluer les différentes pertes dans les conditions nominales d'utilisation du transformateur.

On procède alors à trois essais différents :

- Essai à vide ;
- Essai en court-circuit ;
- Essai en charge.

#### a. Essai à vide

Il consiste à mesurer les pertes fer et le schéma du montage correspondant est le suivant :



**Figure 3.35** : Schéma de montage d'un essai à vide

A vide le circuit secondaire est ouvert,  $I_2 = 0 \Rightarrow P_2 = 0$  et  $P_{J_2} = 0$ .

- Bilan de puissances :

$$P_{10} = P_{J_1} + P_{Fe}$$

Toute l'énergie absorbée au primaire est utilisée pour compenser les pertes fer et les pertes joules au primaire.

A vide  $I_{10}$  est très faible. Par conséquent  $P_{J_1} \ll P_{Fe}$ .

Finalement,

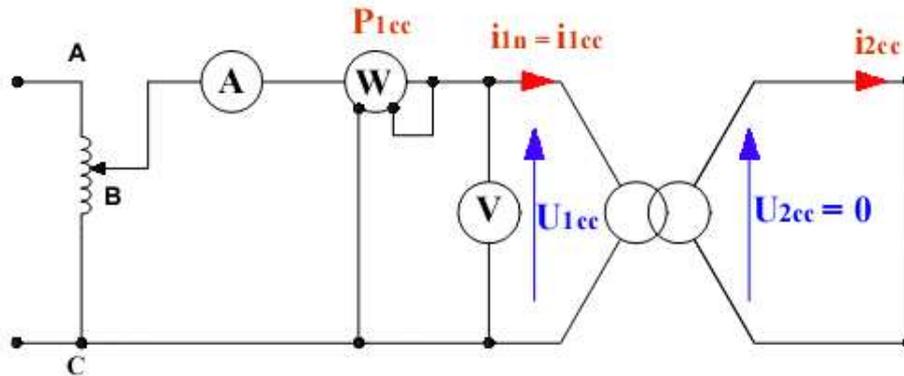
$$P_{10} = P_{Fe}$$

Les pertes fer dépendent essentiellement du champ magnétique donc de la tension  $U_1$  et de la fréquence  $f$ . Comme ces deux grandeurs restent les mêmes à vide ou en charge les pertes fer mesurées à vide sont les mêmes que celles en charge.

Il faut donc naturellement faire cet essai à la tension nominale (ex.  $U_1 = 220$  V)

### b. Essai en court-circuit

Quant à cet essai, il consiste à mesurer les pertes Joule en utilisant une tension réduite normalisée. Le schéma de montage est celui présenté ci-dessous :



**Figure 3.36 :** Schéma de montage d'un essai en court-circuit

Le circuit secondaire est en court-circuit :  $U_2 = 0 \Rightarrow P_2 = 0$

Bilan de puissances :

$$U_2 = 0 \Rightarrow P_2 = 0$$

Toute l'énergie absorbée au primaire est utilisée pour compenser les pertes fer et les pertes joules.

En court-circuit, pour obtenir  $I_{1n}$ , il faut travailler à très faible tension. Par conséquent  $P_{Fe}$  est très faible.

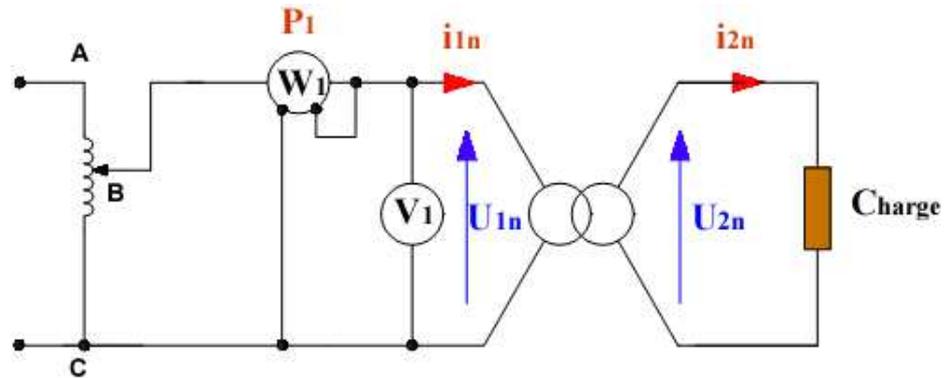
Finalement,

$$P_{1cc} = P_J$$

### c. Essai en charge

Pour cet essai, il faut choisir une charge appropriée pour travailler dans les conditions nominales de tension et de courant.

Le schéma de montage est donc :



**Figure 3.37** : Schéma de montage d'un essai en charge en mesurant  $P_1$  seulement

On mesure  $P_1$ .

Puisqu'on a toutes les nécessaires pour le calcul du rendement, on aura alors :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_{10} - P_J}{P_1}$$

## Chapitre 4 : TRANSFORMATEURS TRIPHASES

### 4.1 Présentation

Pour changer la tension d'un système triphasé, on peut utiliser un ensemble de trois transformateurs monophasés formant ainsi de banc triphasé dans le cas de très grande puissance dans les réseaux de distribution d'énergie ou d'unité triphasé à 3 ou 5 colonnes dans les cas des puissances habituelles.

Pour le premier cas, les études que nous avons effectuées en monophasé s'appliquent intégralement à chacune des phases :

- Chaque primaire est relié en une phase et fonctionne en récepteur ;
- Les trois secondaires constituent trois générateurs qui peuvent être relié en étoile (Y) ou en triangle ( $\Delta$ ).

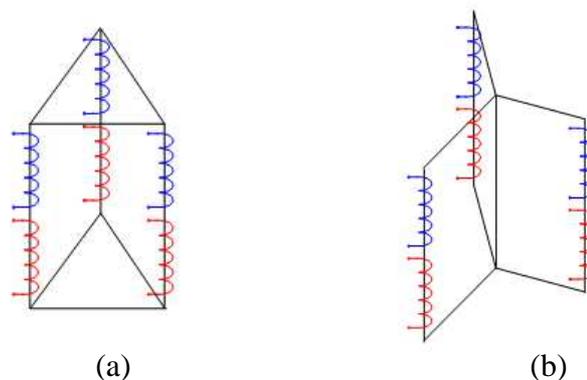
La puissance totale du banc est la somme des puissances de chaque phase.

Et pourtant, il est plus avantageux d'utiliser un seul transformateur triphasé, on gagne à la fois sur l'encombrement et sur le poids du fer utilisé mais il faut tenir compte des inductances mutuelles entre les différents enroulements couplés magnétiquement entre eux.

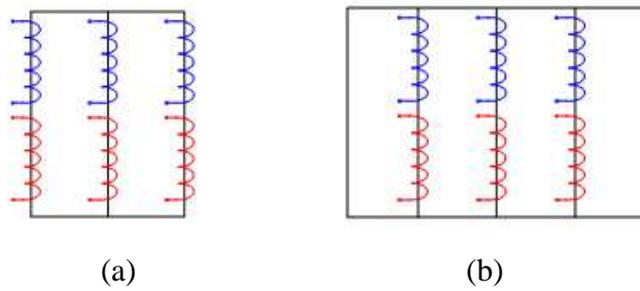
### 4.2 Constitution

Un transformateur triphasé peut être réalisé à partir de trois unités monophasées dont les circuits magnétiques sont distincts, donc à flux indépendants.

Cependant, la plupart du temps, on emploie un circuit magnétique triphasé. Pour cela, le guidage des lignes d'induction nécessite un circuit magnétique dont la forme, pour des raisons de simple économie de matière, doit être adaptée à la nature triphasée des sources de tensions créant l'induction dans le matériau. Il est possible, comme le montre la figure suivante, d'envisager les dispositions suivantes :



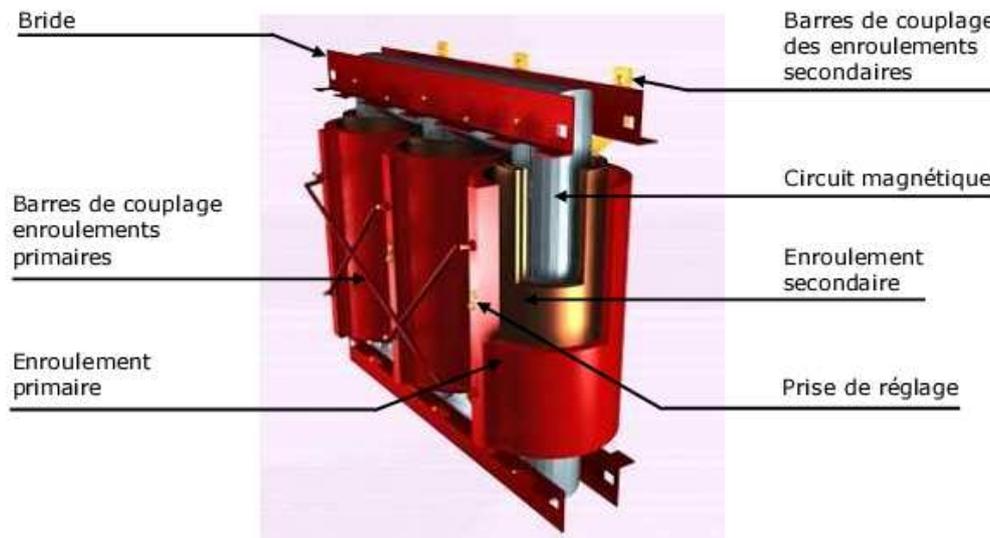
**Figure 4.1** : Disposition idéale des noyaux  
 (a) : circuit magnétique à culasse en triangle  
 (b) : circuit magnétique à culasse en étoile



**Figure 4.2 :** Disposition réelle des noyaux  
 (a) : circuit magnétique à culasse droite avec 3 noyaux  
 (b) : circuit magnétique à culasse droite avec 5 noyaux

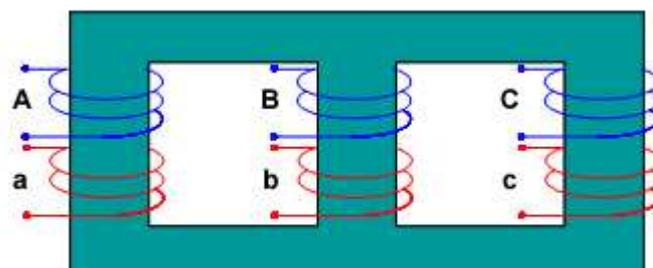
Comme la conception des noyaux pour les deux premières dispositions est très complexe (figures 4.1), pratiquement, on utilise les deux autres pour la disposition réelle du circuit magnétique (figure 4.2).

Chaque noyau porte deux enroulements concentriques ou en galette, un primaire et un secondaire.



**Figure 4.3 :** Constitution d'un transformateur triphasé

D'où la représentation conventionnelle d'un transformateur triphasé :



**Figure 4.4 :** Représentation d'un transformateur triphasé

Généralement, un transformateur triphasé est symbolisé comme la représentation suivante :



Figure 4.5 : Symboles d'un transformateur triphasé

### 4.3 Equations des tensions

La figure suivante représente un transformateur à trois colonnes portant chacune d'elles de deux enroulements primaire et secondaire à  $N_1$  et  $N_2$  spires.

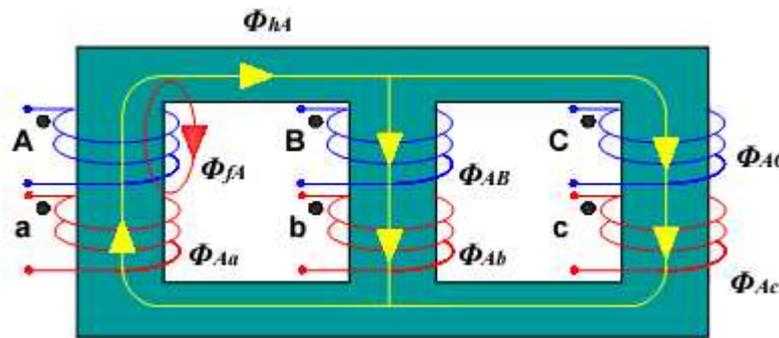


Figure 4.6 : Distribution de flux dans transformateur triphasé

L'équation de la tension primaire pour la phase A s'écrit :

$$\underline{U}_A = R_A \cdot \underline{I}_A + j\omega L_{fA} \cdot \underline{I}_A + j\omega L_{hA} \cdot \underline{I}_A + j\omega M_h \cdot \underline{I}_a + j\omega M_{AB} \cdot \underline{I}_B + j\omega M_{AC} \cdot \underline{I}_C + j\omega M_{Ab} \cdot \underline{I}_b + j\omega M_{Ac} \cdot \underline{I}_c$$

(4.1)

avec

$$L_{fA} = N_1^2 \cdot \Lambda_{fA} \tag{4.2}$$

$$L_{hA} = N_1^2 \cdot \Lambda_h \tag{4.3}$$

$$M_h = N_1 \cdot N_2 \cdot \Lambda_h \tag{4.4}$$

où

$L_{fA}$  : l'inductance de fuite de l'enroulement A

$L_{hA}$  : l'inductance principale de l'enroulement A

$M_h$  : l'inductance mutuelle entre les enroulements A et a

Du schéma de la distribution du flux et de la convention des signes des mutuelles, on a :

$$M_{AB} = M_{BC} = M_{AC} = -\frac{1}{2} \cdot N_1^2 \cdot \Lambda_h = -\frac{1}{2} \cdot L_{hA} \quad (4.5)$$

$$M_{Ab} = M_{bc} = M_{Ac} = -\frac{1}{2} \cdot M_h \quad (4.6)$$

Pour une charge symétrique, on a :

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0 \quad (4.7)$$

$$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0 \quad (4.8)$$

En tenant compte des relations (4.7) et (4.8), l'équation de la tension primaire pour la phase considérée devient :

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= R_A \cdot \underline{I}_A + j\omega L_{fA} \cdot \underline{I}_A + j\omega L_{hA} \left( \underline{I}_A - \frac{1}{2} (\underline{I}_B + \underline{I}_C) \right) + j\omega M_h \left( \underline{I}_a - \frac{1}{2} (\underline{I}_b + \underline{I}_c) \right) \\ &= R_A \cdot \underline{I}_A + j\omega L_{fA} \cdot \underline{I}_A + \frac{3}{2} j\omega L_{hA} \cdot \underline{I}_A + \frac{3}{2} j\omega M_h \cdot \underline{I}_a \end{aligned} \quad (4.10)$$

d'où

$$\underline{U}_A = R_A \cdot \underline{I}_A + j\omega L_{fA} \cdot \underline{I}_A + \frac{3}{2} j\omega L_{hA} \cdot \underline{I}_A + \frac{3}{2} j\omega M_h \cdot \underline{I}_a \quad (4.12)$$

Comme

$$\underline{I}_a = \frac{N_1}{N_2} \cdot \underline{I}_a' = \ddot{u} \cdot \underline{I}_a' \quad (4.13)$$

$$M_h = \frac{N_2}{N_1} \cdot L_h = \frac{L_h}{\ddot{u}} \quad (4.14)$$

où

$\ddot{u}$  : le rapport de nombre de spires des enroulements primaire et secondaire

$\underline{I}_a'$  : le courant secondaire ramené au primaire

En remplaçant  $\underline{I}_a$  et  $M_h$  par leurs expressions respectives dans la relation (4.2), on aura la nouvelle expression de la tension  $\underline{U}_A$  :

$$\underline{U}_A = R_A \cdot \underline{I}_A + j\omega L_{fA} \cdot \underline{I}_A + \frac{3}{2} j\omega L_{hA} (\underline{I}_A + \underline{I}_a') \quad (4.15)$$

Posons

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_A + \underline{I}_a \quad (4.16)$$

La relation (4.5) devient alors :

$$\underline{U}_A = R_A \cdot \underline{I}_A + j\omega L_{fA} \cdot \underline{I}_A + \frac{3}{2} j\omega L_{hA} \cdot \underline{I}_0 \quad (4.17)$$

or

$$X_{fA} = \omega L_{fA} \quad (4.18)$$

$$X_{hA} = \omega L_{hA} \quad (4.19)$$

où  $X_{fA}$  et  $X_{hA}$  sont respectivement la réactance de fuite et la réactance principale.

Finalement, l'expression de la tension  $\underline{U}_A$  s'écrit :

$$\underline{U}_A = R_A \cdot \underline{I}_A + jX_{fA} \cdot \underline{I}_A + \frac{3}{2} jX_{hA} \cdot \underline{I}_0 \quad (4.20)$$

On constate que l'équation est de la même forme que celle établit pour un transformateur monophasé mais avec une réactance principale  $X_{h3\phi} = \frac{3}{2} jX_{h1\phi}$ . En tenant compte de ce fait, on peut utiliser le même schéma équivalent qu'en monophasé pour chaque phase.

La puissance d'un transformateur triphasé est déterminée par la relation :

$$S = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 = \sqrt{3} \cdot U_{1L} \cdot I_{1L} \quad (4.21)$$

où

$U_1$  : la tension de phase

$I_1$  : le courant de phase

$U_{1L}$  : la tension de ligne

$I_{1L}$  : le courant de ligne

## 4.4 Couplage d'un transformateur triphasé

### 4.4.1 Mode de couplage

Comme tout système triphasé, les enroulements primaires (HT) d'un transformateur triphasé peuvent être reliés en étoile ou en triangle. La lettre symbolisant le couplage est en majuscule : soit D pour le couplage triangle, et Y pour le couplage étoile.

Les enroulements secondaires (BT) peuvent être aussi montés en étoile, en triangle ou en zig-zag. La notation du type de branchement est en lettres minuscules : soit 'y' pour étoile, 'd' pour triangle et 'z' pour le zig-zag.

Le couplage zig-zag (z) est un couplage étoile (Y) où la moitié de l'enroulement secondaire se trouve sur deux noyaux différents et correspond ainsi deux enroulements primaires appartenant à deux phases différentes.

On appelle alors couplage d'un transformateur triphasé, l'association de deux types de branchement au primaire et au secondaire.

Pour représenter le schéma d'un transformateur triphasé, on fait les conventions suivantes.

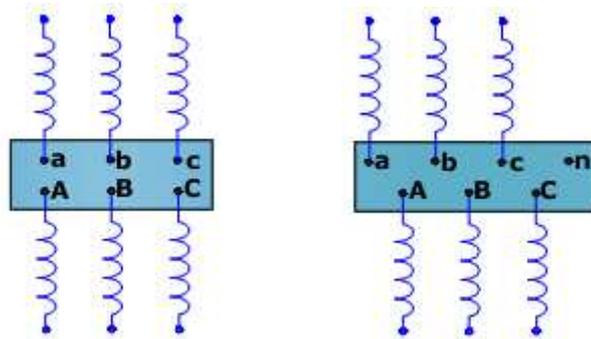
On note par :

- A, B, C les bornes de la haute tension,
- a, b, c les bornes de la basse tension.

S'il y a un neutre, on ajoute N ou n à la borne correspondante.

Sur le couvercle les bornes homologues sont en regard, la borne A étant à gauche d'un observateur placé devant le côté haute tension.

Pour représenter l'enroulement, on suppose l'observateur placé face aux connexions qu'il représente, soit du côté A, B, C quand il étudie la haute tension, soit du côté a, b, c, quand il étudie la basse tension.



**Figure 4.7 :** Représentation conventionnelle d'un transformateur triphasé

L'ensemble de la figure ci-dessus se présente donc comme un rabattement sur le plan du couvercle de sorte que, si on suppose le transformateur vertical, sur chaque bobine la partie la plus éloignée de la borne correspondante est l'extrémité inférieure.

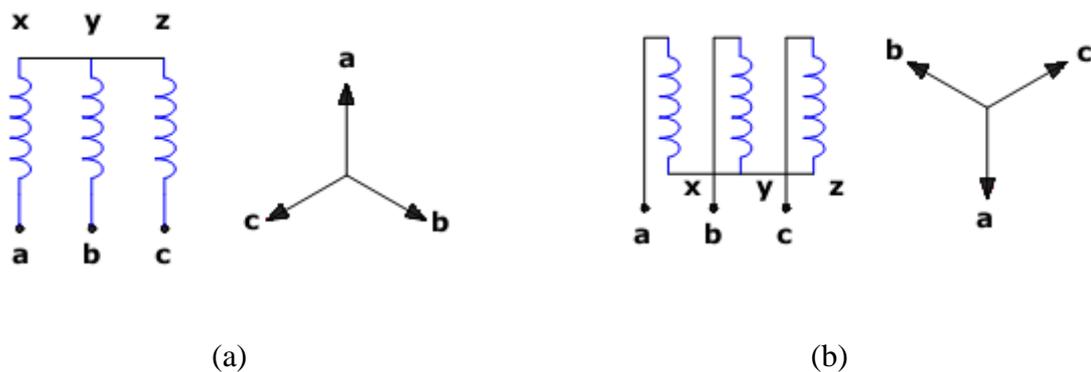
Nous supposerons toujours dans nos schémas que les enroulements sont bobinés dans le même sens.

#### 4.4.2 Mode de connexion des enroulements de transformateurs triphasés

Raisonnons par exemple sur l'enroulement basse tension. Nous désignons ses trois bornes par a, b, c (éventuellement encore n s'il y a un neutre). Dans cette première partie, nous convenons de représenter verticalement la tension entre l'extrémité supérieure et l'extrémité inférieure de la bobine placée sur le noyau 1. La tension sera en retard de  $120^\circ$  sur celle-ci dans la bobine placée sur le noyau médian et de  $240^\circ$  entre les bornes homologues de la bobine placée sur le noyau 3.

Examinons comment se présente le diagramme de temps des tensions suivant le mode de connexion des enroulements.

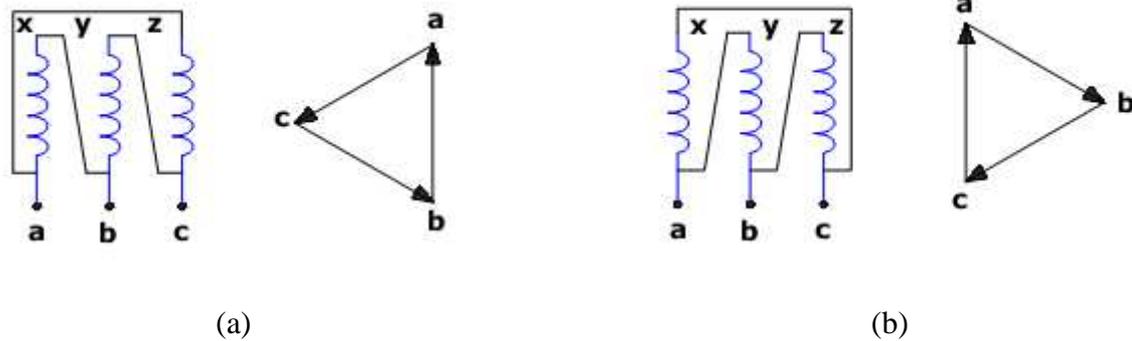
##### a- groupement en étoile (notation y)



**Figure4.8** : Couplage en étoile

- (a) : la connexion neutre reliant les bornes inférieures homologues de trois bobines
- (b) : la connexion neutre reliant les trois bornes homologues supérieures ce qui entraîne une rotation de  $180^\circ$  du diagramme de temps.

Pour la suite, on va prendre ce mode de connexion selon la figure (a) pour le couplage des enroulements BT et HT en étoile.

**b- groupement en triangle (notation d)****Figure 4.9 : Couplage en triangle**

(a) : avec connexion de liaison ascendant de droite à gauche, ba étant représenté, verticalement, cb en retard de  $120^\circ$ , ac de  $240^\circ$ ; on dispose les trois vecteurs en triangle

(b) : avec connexion de liaison ascendant de gauche à droite

Pour la suite, on va prendre ce mode de connexion selon la figure (a) pour le couplage des enroulements en triangle.

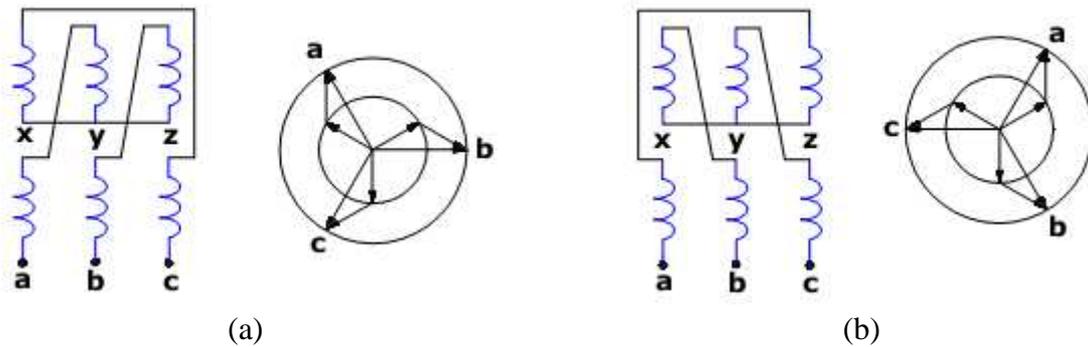
**c- groupement en zig-zag (notation z)**

Sur la basse tension des réseaux de distribution déséquilibrés quatre fils, on peut utiliser la connexion zig-zag. Dans celle-ci, chacune des trois bobines basse tension (BT) est divisée en deux moitiés. Une phase est alors constituée par la liaison en série de deux demi-bobines placées sur deux noyaux différents et prises en sens inverse puis les couplant en étoile (en allant de la borne d'entrée de la phase à la borne de sortie, on en parcourt une de bas en haut et l'autre de haut en bas).

Dans ces conditions, les deux forces électromotrices qui s'ajoutent sont déphasées entre elles de  $60^\circ$ . La force électromotrice résultante d'une  $\sqrt{3}$  fois celle d'une demi-bobine. Il en phase n'est que résulte que pour obtenir la même tension, il faudra augmenter le nombre de spires BT dans le rapport  $2/\sqrt{3}$  et comme elles resteront parcourues par le même courant, le poids de cuivre BT sera ainsi augmenté dans le même rapport. En contrepartie, une charge monophasée BT se trouve répartie sur deux noyaux et intéresse donc deux phases de la HT, ce qui atténuera le déséquilibre sur ce réseau.

Pour la même position du neutre que sur la figure (a), les liaisons entre demi-bobines descendent cette fois de gauche à droite. Pour les mêmes flux dans les noyaux, les vecteurs résultants ont tourné de  $60^\circ$ . Les trois phases ainsi obtenues sont associées en étoile. A priori, on peut placer la connexion neutre reliant trois bornes homologues à quatre niveaux

différents. Pour l'un d'eux (liaison des bornes supérieures des demi-bobines inférieures) la figure (5.8) représente respectivement les schémas :



**Figure 4.10 :** Couplage en zig-zag

- (a) : avec connexion entre demi-bobine ascendante de gauche à droite
- (b) : avec connexion entre demi-bobine montant de droite à gauche

On voit que le diagramme de temps des tensions de sortie correspondant tourne de 60° quand on passe d'un montage à l'autre.

Comme le précédent, prenons la première présentation pour le couplage zig-zag des enroulements BT.

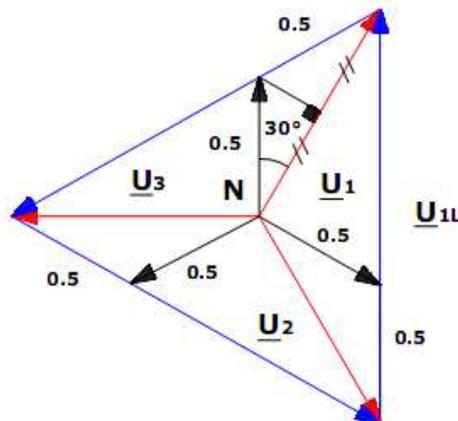
Pour un même flux et même nombre de spires, on a les tensions suivantes pour les différents couplages :

| Couplage | Etoile     | Triangle | Zig-zag      |
|----------|------------|----------|--------------|
| $U_1$    | 1          | 1        | $\sqrt{3}/2$ |
| $U_{1L}$ | $\sqrt{3}$ | 1        | $3/2$        |

**Tableau 4.1 :** Tension pour les différents couplages

En effet,

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= 2 * 0.5 * \cos 30^\circ \\ &= 2 * 0.5 * \sqrt{3}/2 \\ \underline{U}_L &= \sqrt{3}/2 \end{aligned}$$



### 4.5 Indice horaire

Selon le couplage choisi, le déphasage entre tensions phase-neutre homologues (par exemple  $U_{an}$  et  $U_{AN}$ ) est imposé.

En triphasé, les déphasages obtenus sont nécessairement des multiples de  $30^\circ$  ( $\frac{\pi}{6}$ ).

En posant  $\theta = (U_{an} \hat{U}_{AN})$ , l'indice horaire, c'est le retard de la tension  $\vec{U}_{an}$  côté BT par rapport à la tension simple homologue  $\vec{U}_{AN}$  côté HT. C'est un nombre entier n tel que  $\theta = n \frac{\pi}{6}$  ; avec  $\theta > 0$ .  $\theta$  varie de 0 à  $330^\circ$ , donc n varie de 0 à 11.

Le terme indice horaire correspond à l'indication de l'heure sur l'horloge où  $\vec{U}_{AN}$  serait assimilée à l'aiguille des minutes placée sur 12 et  $\vec{U}_{an}$  à l'aiguille des heures placée sur n.

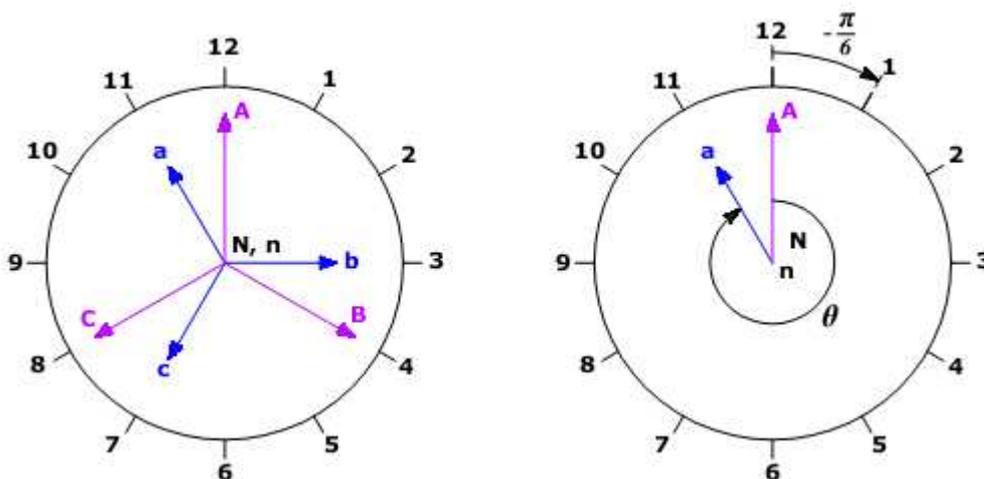


Figure 4.11 : Définition de l'indice horaire

#### 4.5.1 Exemples d'applications

Représentons par exemple sous la forme précitée plus haute le schéma d'un transformateur triphasé dont les couplages sont Yd5 et Yz11 puis traçons en faisant coïncider leurs centres, les diagrammes de temps des enroulements haute et basse tensions.

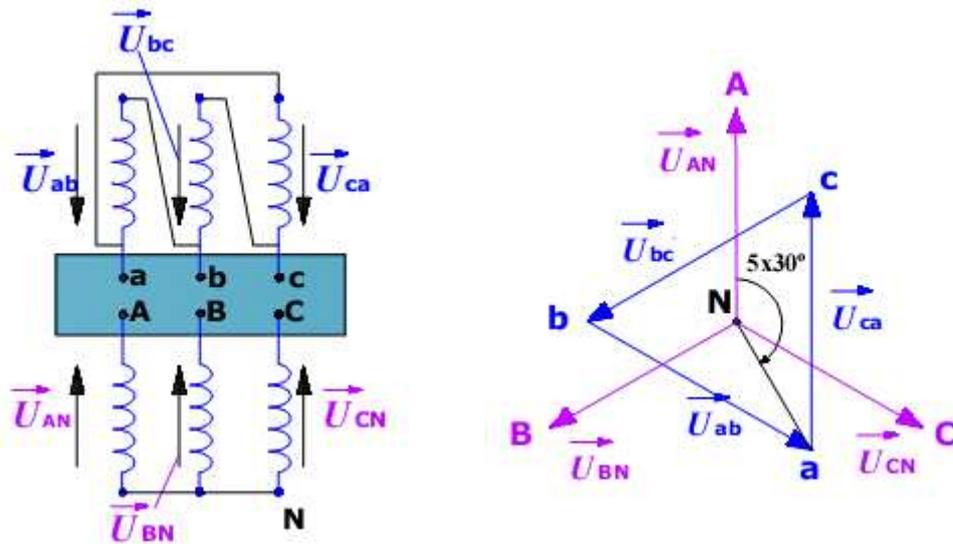


Figure 4.12 : Schéma de couplage et diagramme de tensions d'un transformateur Yd5

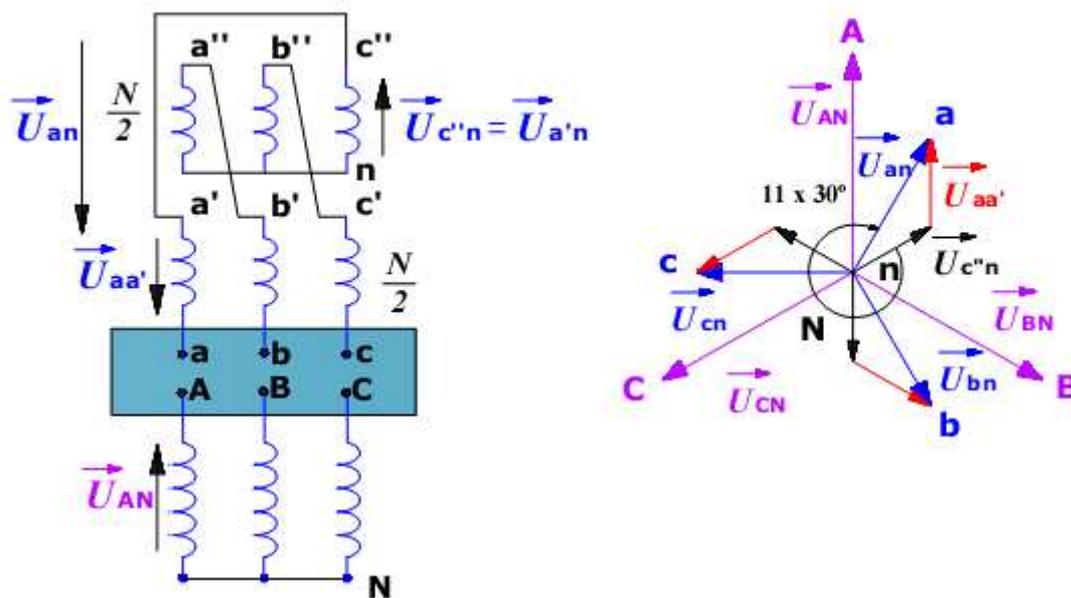
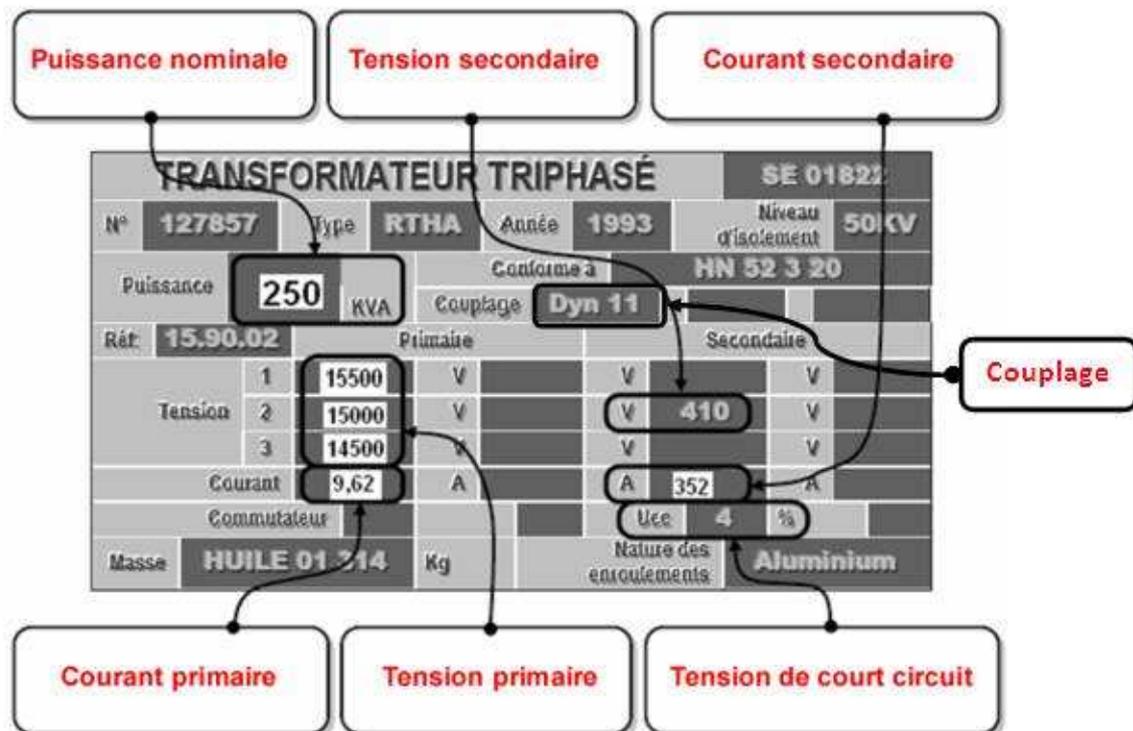


Figure 4.13 : Schéma de couplage et diagramme de tensions d'un transformateur Yz11

Il y a quatre groupes de couplages à savoir :

- Groupe I : 0, 4, 8 ;
- Groupe II : 2, 6, 10 ;
- Groupe III : 1, 5, 9 ;
- Groupe IV : 3, 7, 11.

Comme les courants, tensions et puissances, le couplage des enroulements primaire et secondaire sont portés sur la plaque signalétique du transformateur.



**Figure 4.14** : Description d'une plaque signalétique d'un transformateur

Ainsi, les groupes de couplages les plus utilisés sont les suivants :

- pour le groupe I : Dd0, Yyo, Dz0 ;
- pour le groupe II : Dd6, Yy6, Dz6 ;
- pour le groupe III : Dy5, Yd5, Yz5 ;
- pour le groupe IV : Dy11, Yd11, Yz11.

A noter que les transformateurs des groupes I et II ne peuvent pas être couplés qu'avec les transformateurs de même groupe tandis que ceux de groupes III et IV peuvent être couplés en eux si les déphasages sont égaux.

## 4.6 Mise en parallèle des transformateurs

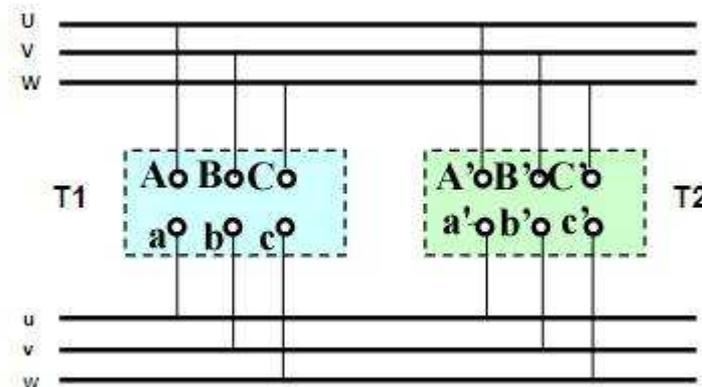
### 4.6.1 But

La puissance transmise par une centrale au réseau évolue au cours du temps en fonction de la consommation. Un transformateur unique qui est capable de transmettre la pointe maximale de consommation serait en général utilisé très en-dessous de son fonctionnement nominal, avec un rendement médiocre ou mauvais. On préfère disposer de

plusieurs transformateurs de moindre puissance fonctionnant en parallèle de telle sorte qu'ils soient toujours au voisinage de leurs conditions nominales de marche.

#### 4.6.2 Conditions de couplage en parallèle

Des transformateurs sont en parallèle lorsque leurs primaires sont alimentés par un même réseau et leurs secondaires connectés à une même ligne ou débitent dans une même charge.



**Figure 4.15 :** Mise en parallèle de deux transformateurs triphasés

Cette opération ne peut être réalisée si les conditions suivantes sont satisfaites :

- égalité de rapport de transformation ;
- Identité de groupes de couplage ;
- égalité des tensions de court-circuit.

A ces trois conditions, on peut rajouter l'égalité de l'argument  $\varphi_{cc}$  pour une mise en parallèle idéale. La deuxième condition est impérative, les autres admettent une certaine tolérance fixée par les normes. Pratiquement on ne tolère pas un écart de rapport de transformation supérieur à 1%.

La condition sur l'égalité de tension de court-circuit est nécessaire pour obtenir une répartition de charge proportionnellement aux puissances apparentes des transformateurs.

En effet, la répartition des puissances est inversement proportionnelle aux impédances de court-circuit. L'écart maximal admissible pour la tension de court-circuit est de 10%.

A part des conditions citées ci-dessus, on doit s'assurer que l'ordre de branchement des phases soit le même pour les deux transformateurs.

## **Deuxième partie : REALISATION ET PRESENTATION DU DIDACTICIEL**

**Introduction**

Après avoir établi les différentes équations régissant le fonctionnement du transformateur, nous allons passer à la réalisation du didacticiel. Ce logiciel consiste à simuler un transformateur lors de ses différents fonctionnements.

Ce logiciel comprend deux grandes parties dont :

- La première partie montre le didacticiel en question,
- La seconde montre une interface avec laquelle on peut simuler les différents essais d'un transformateur.

## Chapitre 5 : REALISATION ET CONCEPTION DU PROGRAMME

### 5.1 Choix du langage de programmation

Le choix du langage de programmation est l'un des facteurs les plus importants pour la réussite de la réalisation d'un logiciel. En effet, chaque langage a ses propres caractéristiques et ces caractéristiques doivent être compatibles avec les contraintes et conditions exigées par le cahier des charges. Le choix doit être fait en fonction de leur souplesse, leur adaptation aux fonctions exigées et aux ressources matérielles disponibles.

Dans le cadre de notre étude, le premier choix se repose sur un logiciel qui sait exprimer, faire des opérations dans l'ensemble des nombres complexes, enfin il présente une bonne interface comme les logiciels mis sur le marché public actuellement.

Alors on a choisi le Delphi version 7 de BORLAND qui répond à ces différents caractères énumérés plus haut et le langage HTML pour la réalisation de l'aide ainsi que les cours de transformateur donné dans ce didacticiel.

De plus DELPHI7 a les caractéristiques suivantes :

- Environnement de développement de type RAD (Rapid Application Development)
- Réalisation rapide et simple de l'application Windows
- Présence d'un ensemble de composants visuels prêt à l'emploi
- Utilisation du langage Pascal qui est le plus proche du langage humain
- Delphi est orienté objet et offre une visualisation excellente via une interface préprogrammée.

### 5.2 Réalisation du programme

Pour faciliter la réalisation de ce travail, on a représenté le didacticiel sous forme d'une page HTML. Pour cela, les théories qu'on a adoptées dans la première partie seront converties en fichier html. Le but c'est d'avoir une page dynamique pour faciliter son utilisation.

#### 5.2.1 Le HTML

Le HTML (HyperText Markup Language) est le "langage" qui permet à un navigateur Web d'afficher un document Web selon une certaine structure. Il ne s'agit pas d'un langage proprement parlé (dans le sens "interprété" ou "compilé") mais plutôt d'un format de document.

Le HTML, c'est un simple fichier texte contenant des balises permettant de mettre en forme le texte, les images, etc. Précisément c'est un langage à balises.

Une balise est une commande (un nom) encadrée par le caractère inférieur (<) et le caractère supérieur (>) par exemple "<p>".

Une page HTML est un simple fichier texte ou script commençant par <HTML> et finissant par </HTML>. Un script HTML contient principalement deux parties : l'en-tête et le corps.

```
<html>
  <head></head>
  <body></body>
</html>
```

**Figure 5.1 :** Structure d'un script HTML

#### **a- Contenu d'un script HTML**

- L'en-tête est délimité par les balises <head>et </head>.C'est une succession de balises (tags) permettant au navigateur Web de savoir de quoi il s'agit. On peut y trouver un résumé de la page, les mots clefs principaux, le titre pour la fenêtre etc.
- Le corps est délimité par les balises <body>et </body>.Le corps (body) est constitué du contenu du document. On y trouve habituellement des divisions (div), des paragraphes (p), des images (img), etc.

Ainsi la page minimum sera comme :

```
<html>
  <head>
    <title> Le Titre </title>
  </head>
  <body>
    Contenu de la page
  </body>
</html>
```

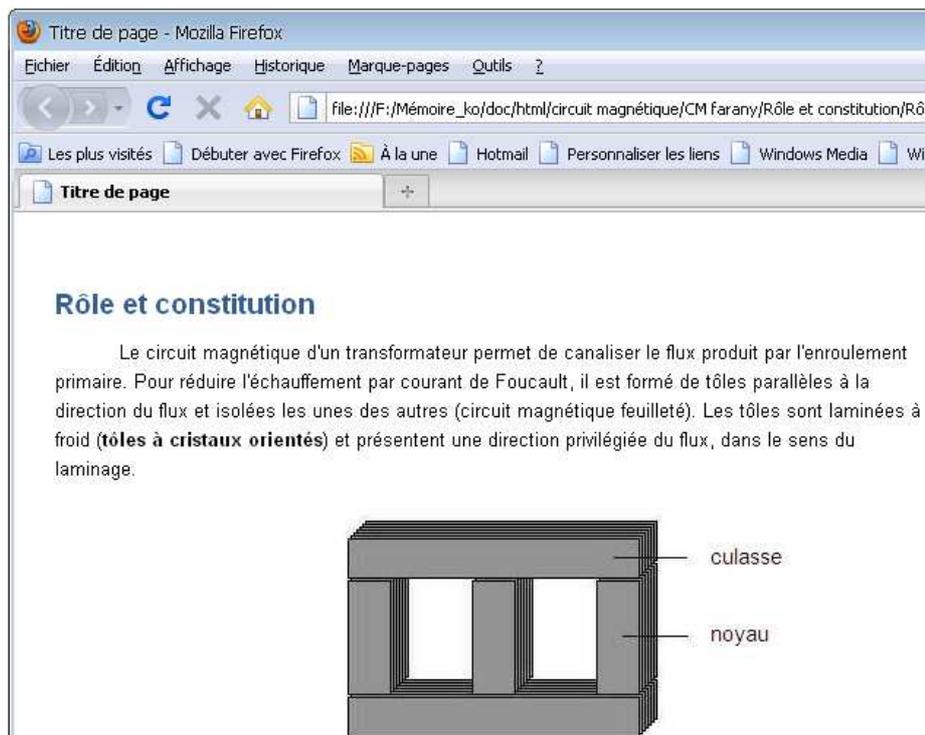
**Figure 5.2 :** Un script HTML complet

Voici un exemple de script HTML pour la création d'une page web dans notre didacticiel

```
<html>
  <head>
    <title>Rôle et constitution du noyau magnétique</title>
  </head>
  <body style="font-family:arial;background-color:#B7B7FF">
    <div id="titre" style="color:#FFE5CE">
      <p>
        Le circuit magnétique d'un transformateur permet
        de canaliser le flux produit par l'enroulement primaire.
      </p>
      <p>
        Pour réduire l'échauffement par courant de Foucault,
        il est formé de tôles parallèles à la direction du flux et
        isolées les unes des autres (circuit magnétique feuilleté).
      </P>
      <p>
        Les tôles sont laminées à froid (tôles à cristaux orientés) et
        présentent une direction privilégiée du flux, dans le sens du laminage.
      </p>
    </div>
  </body>
</html>
```

**Figure 1.3** : Un exemple de script HTML

A ce script correspond la page web suivante :



**Figure 5.4** : Un exemple de page web

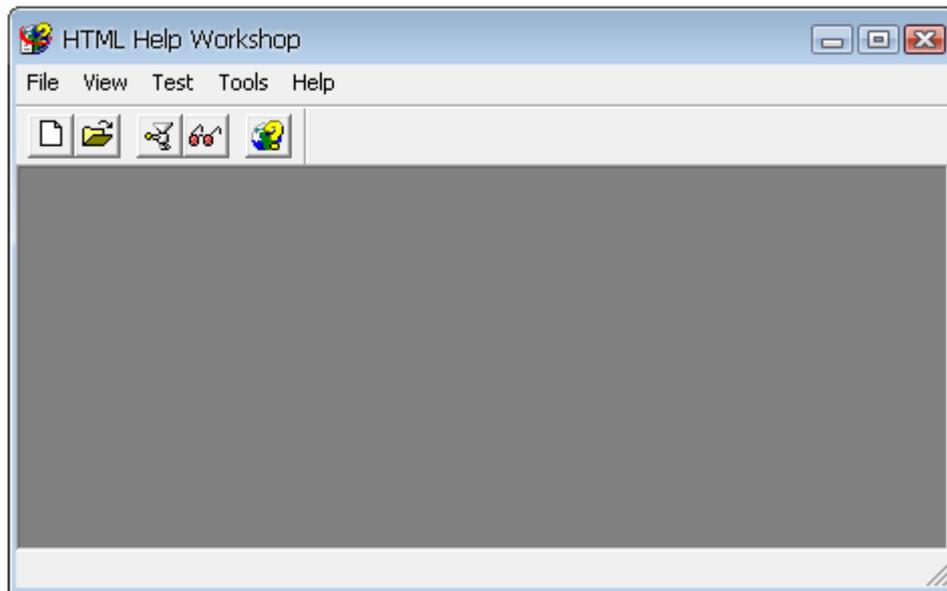
Le fichier obtenu, c'est-à-dire la page web obtenue porte l'extension « .htm » ou « .html », c'est l'extension d'un fichier HTML.

Après avoir tous les fichiers HTML, on doit les combiner dans seul fichier d'où l'extension cette fois-ci porte le nom « .chm ».

Pour concevoir alors ce fichier, nous allons recourir à HTML Help, un logiciel expert pour la création de ce type de fichier.

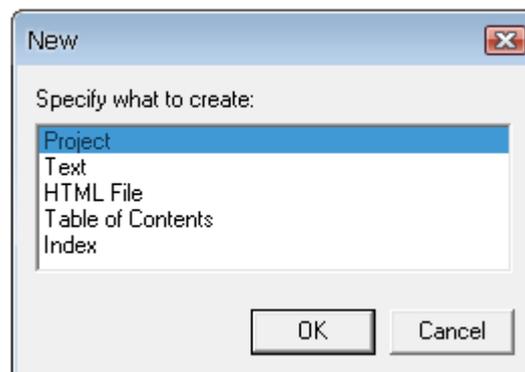
Pour cela, la procédure est la suivante :

- En double cliquant sur l'icône de Html Help, la fenêtre suivante apparaît sur l'écran, c'est l'espace de travail de Html Help.



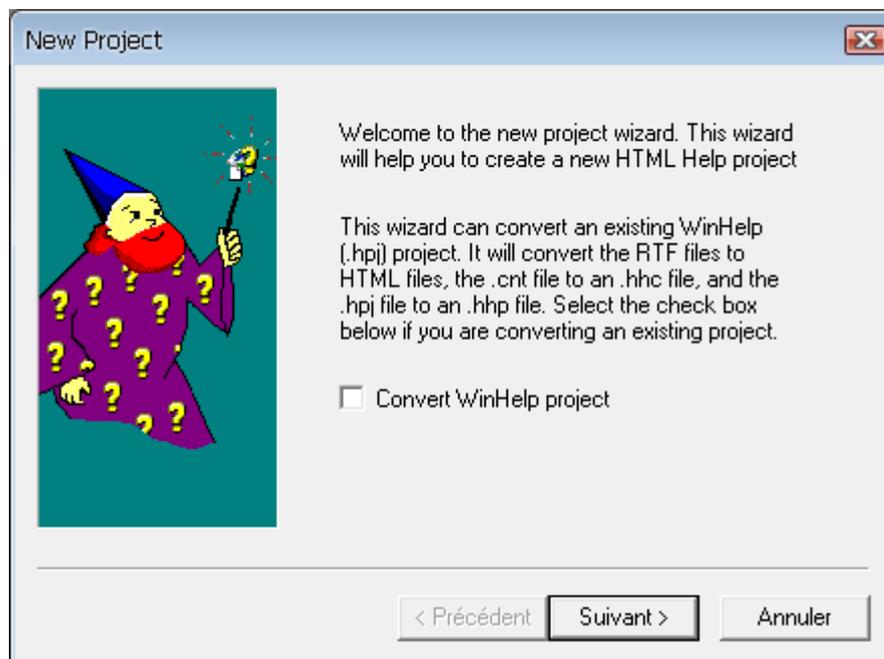
**Figure 5.5 :** Espace de travail de Html Help

- Dans HTML Workshop, on clique sur le bouton  , puis une seconde fenêtre surgit, puis on sélectionne « Project » puis « OK ».



**Figure 5.6 :** Création d'un projet

- Un assistant demande si on veut convertir un ancien projet WinHelp. Pour notre cas, on ne prend pas cette option et on clique seulement sur le bouton « **Suivant** ».



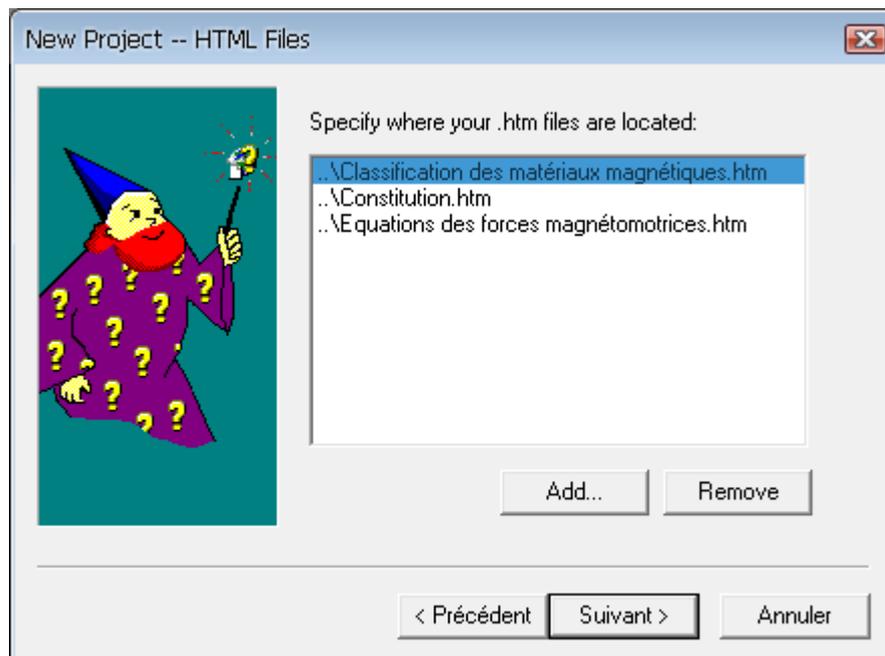
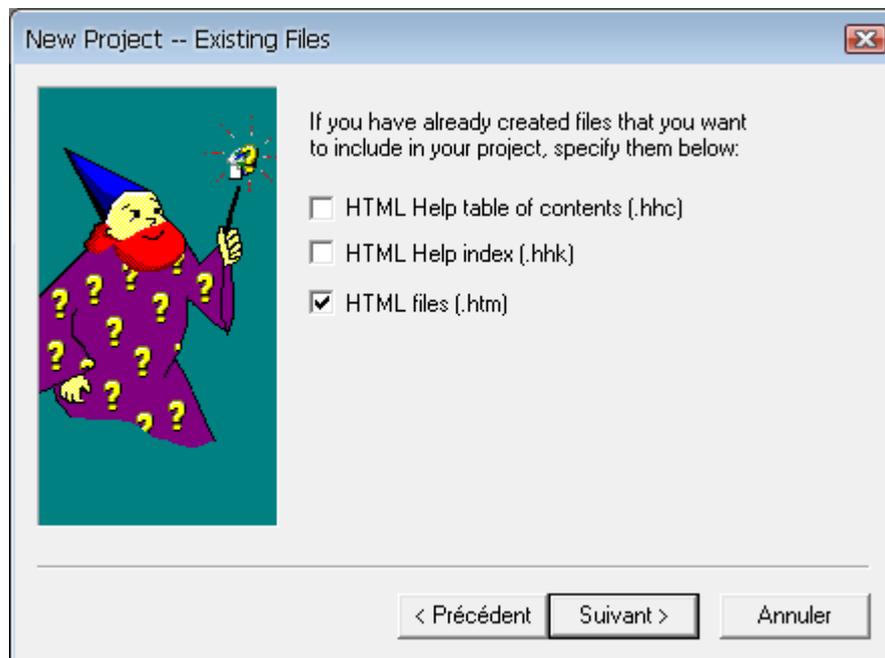
**Figure 5.7** : Création d'un projet

- Entrez le chemin\nom du projet. Par exemple : « C:\cheminTest\TestEssai ». Puis on clique sur « **Suivant** ».



**Figure 5.8** : Création de la destination du projet

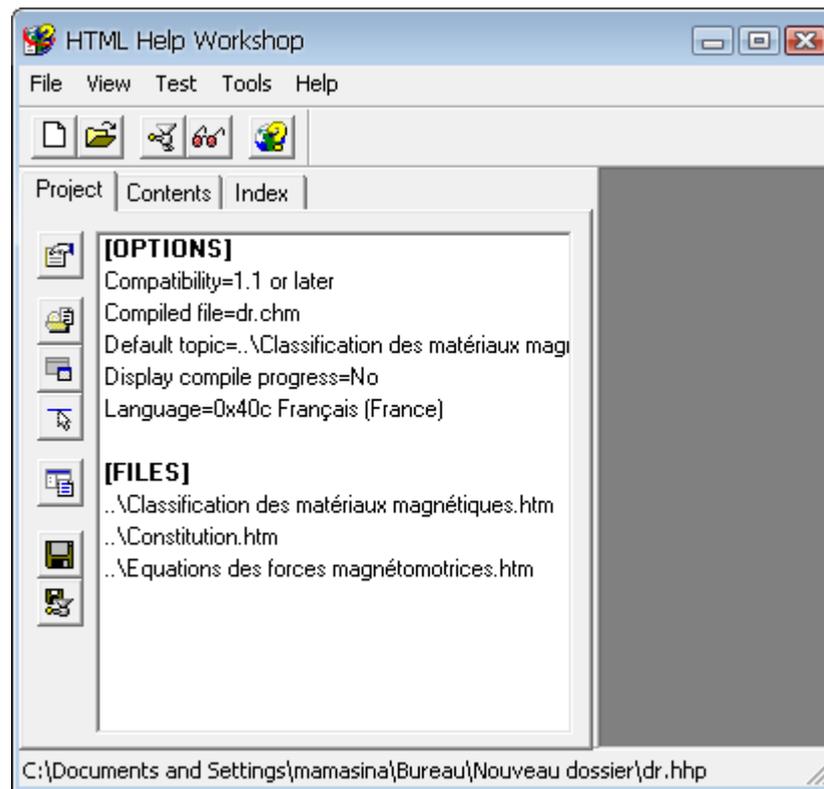
- L'assistant propose d'intégrer les pages HTML déjà réalisées. Puis on coche « **HTML files** » et on sélectionne les pages à intégrer.



**Figure 5.9 : Ajout des fichiers HTML**

- On clique sur « **Suivant** » puis sur « **Terminer** ».

On se retrouve dans la fenêtre principale avec pour affichage, ce qui correspond au fichier hhp.



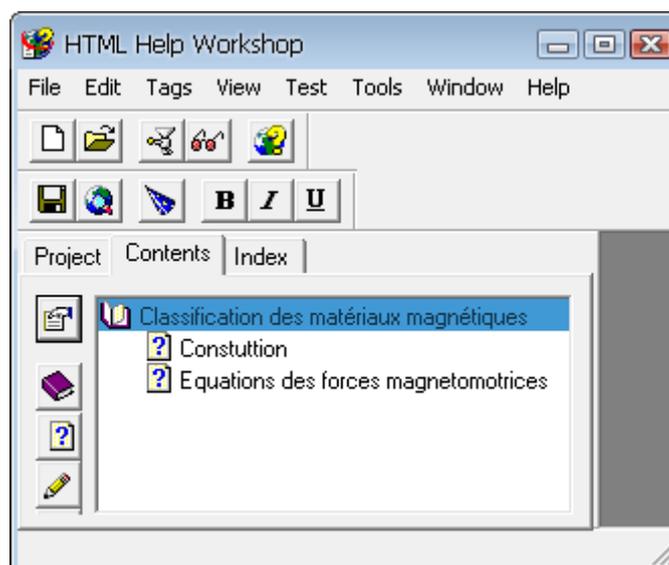
**Figure 5.10 :** Fenêtre principale avec pour affichage

**b- Création du fichier sommaire (HHC)**

- On clique sur l'onglet « **Contents** ».
- On laisse cochée la case « **Create a new contents file** » et on clique sur « **OK** ».
- On donne un chemin\nom au fichier par exemple "SommaireTestEssai.hhc"

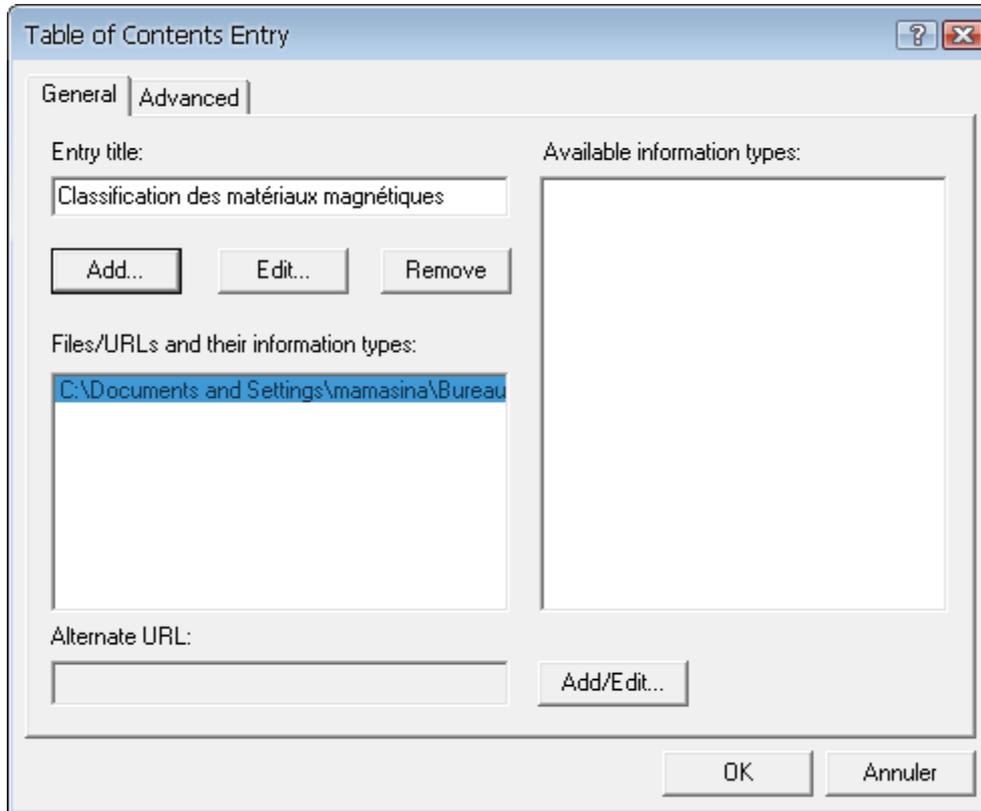
**c- Création de l'arborescence du sommaire :**

Image de ce que l'on cherche à obtenir dans le sommaire de notre fichier :



**Figure 5.11 :** Création du fichier sommaire (HHC)

- On clique sur le bouton  puis sur le bouton « Add... » de façon à sélectionner une des pages HTML précédemment indiquées.
- Faire entrer le texte qui doit apparaître dans l'arborescence dans la case « Entry title ».

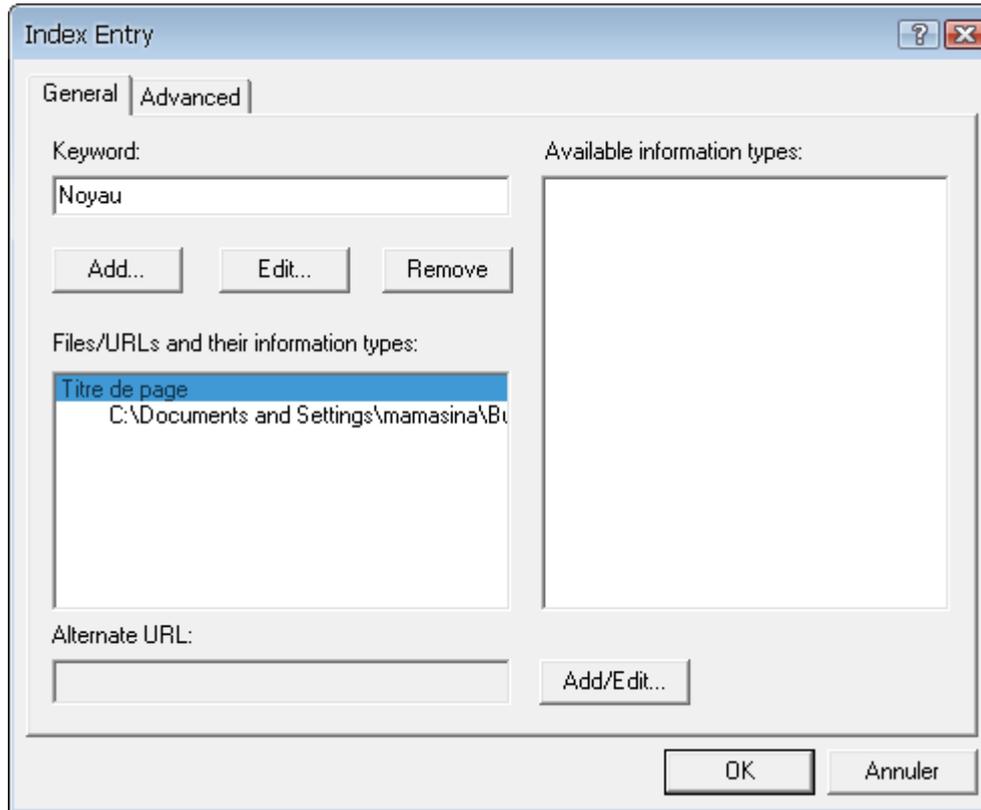


**Figure 5.12** : Création du fichier sommaire (HHC)

- Pour entrer le chapitre « Classification des matériaux magnétiques », on clique sur le bouton  et remplir la case « Entry title ».
- On continue jusqu'à obtenir l'arborescence.

#### **d- Création du fichier Index (HHK)**

- On clique sur l'onglet « Index ».
- On laisse cochée la case « Create a nex index file » et on clique sur « OK ».
- On lui donne un chemin\nom au fichier par exemple « IndexTestEssai.hhc ».
- Pour ajouter un mot clef, on clique sur le bouton .
- Faire entrer le mot clef dans la case « keyword » et on clique sur « Add » pour sélectionner les rubriques à lui associer.



**Figure 5.13** : Création du fichier Index

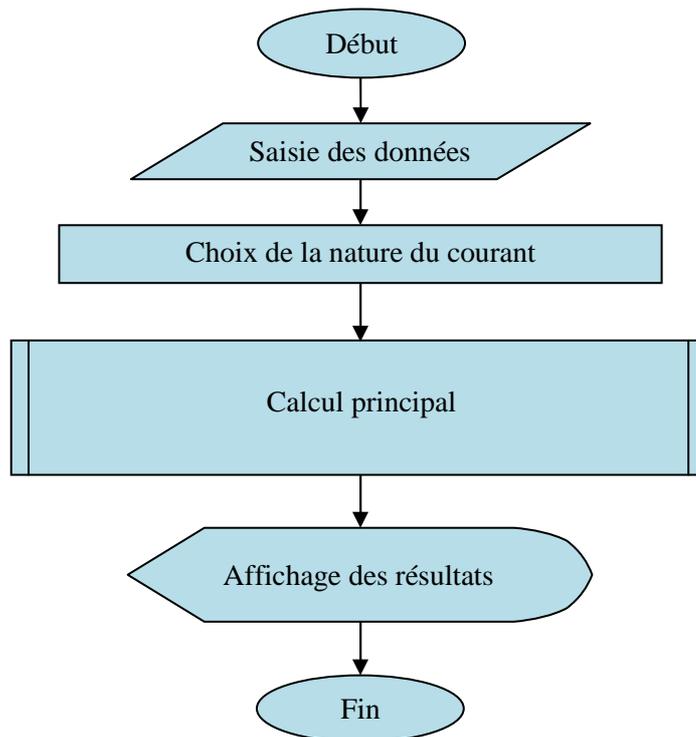
***e- Compilation et visualisation du résultat***

Dans l'onglet « Project », on clique sur le bouton  Bien lire le fichier LOG qui s'affiche dans la fenêtre de droite afin de voir les éventuelles erreurs.

Le compilateur a créé un fichier .chm dans le dossier du projet. Double-cliquez dessus pour le lancer et le tester.

Pour la réalisation du programme de calcul pour les essais d'un transformateur ; les paramètres à saisir sont ceux fournis par le constructeur dans les fiches techniques et plaque signalétique comme les tensions et puissances nominales ; la tension de court-circuit et le courant à vide relatives et les charges dédiées au secondaire.

Voici l'organigramme général pour les calculs des éléments du schéma équivalent :



**Figure 5.14 :** Organigramme général de calcul

**Remarque :**

Les détails pour le calcul principal seront donnés dans l'Annexe 1.

### 5.3 Présentation du logiciel

Le logiciel qu'on a conçu est dénommé « *Transformer Didactic's* ». Cette appellation provient de « didacticiel d'un transformateur » traduit en anglais. On a choisi ce nom car ce logiciel est un outil didactique pour l'étude d'un transformateur.

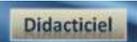
### 5.3.1 Manuel d'utilisation

Après avoir installé « Transformer Didactic's », il se lance automatiquement et la fenêtre d'accueil va apparaître sur l'écran.



Figure 5.15 : Page d'accueil de Transformer Didactic's

Après quelques secondes, cette fenêtre va disparaître et une autre va se pointer au centre de l'écran. On est devant un choix

- Si on clique sur le bouton , la fenêtre correspondante point sur l'écran, c'est l'interface du didacticiel en question.

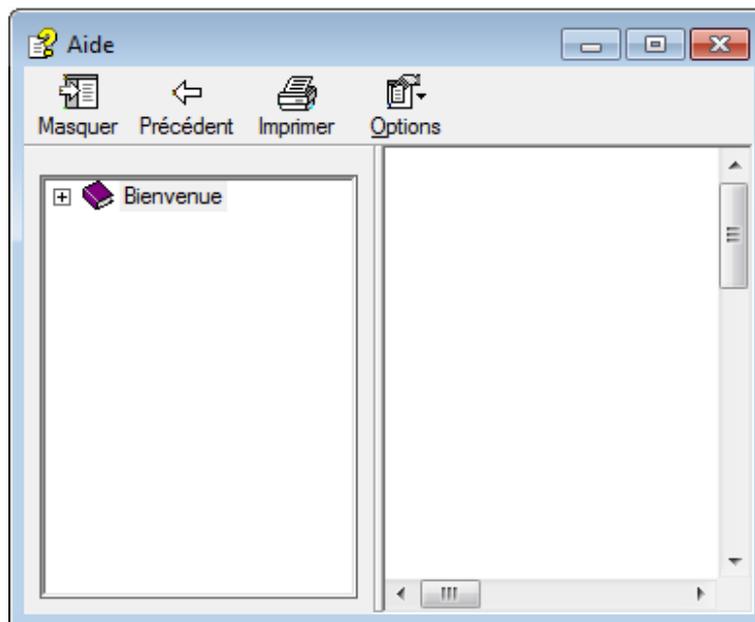
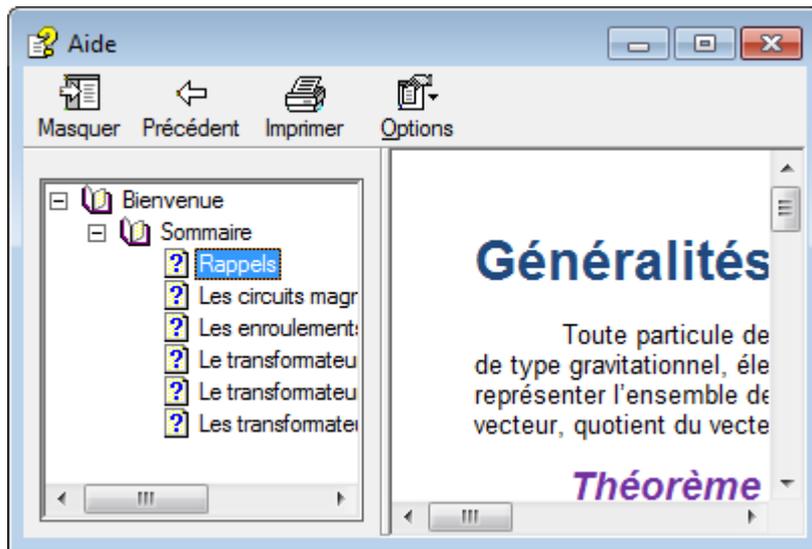


Figure 5.16 : Page d'accueil du didacticiel

Pour voir le contenu, on clique sur le livret violet. On aura :



**Figure 5.17** : Contenu d'un livret

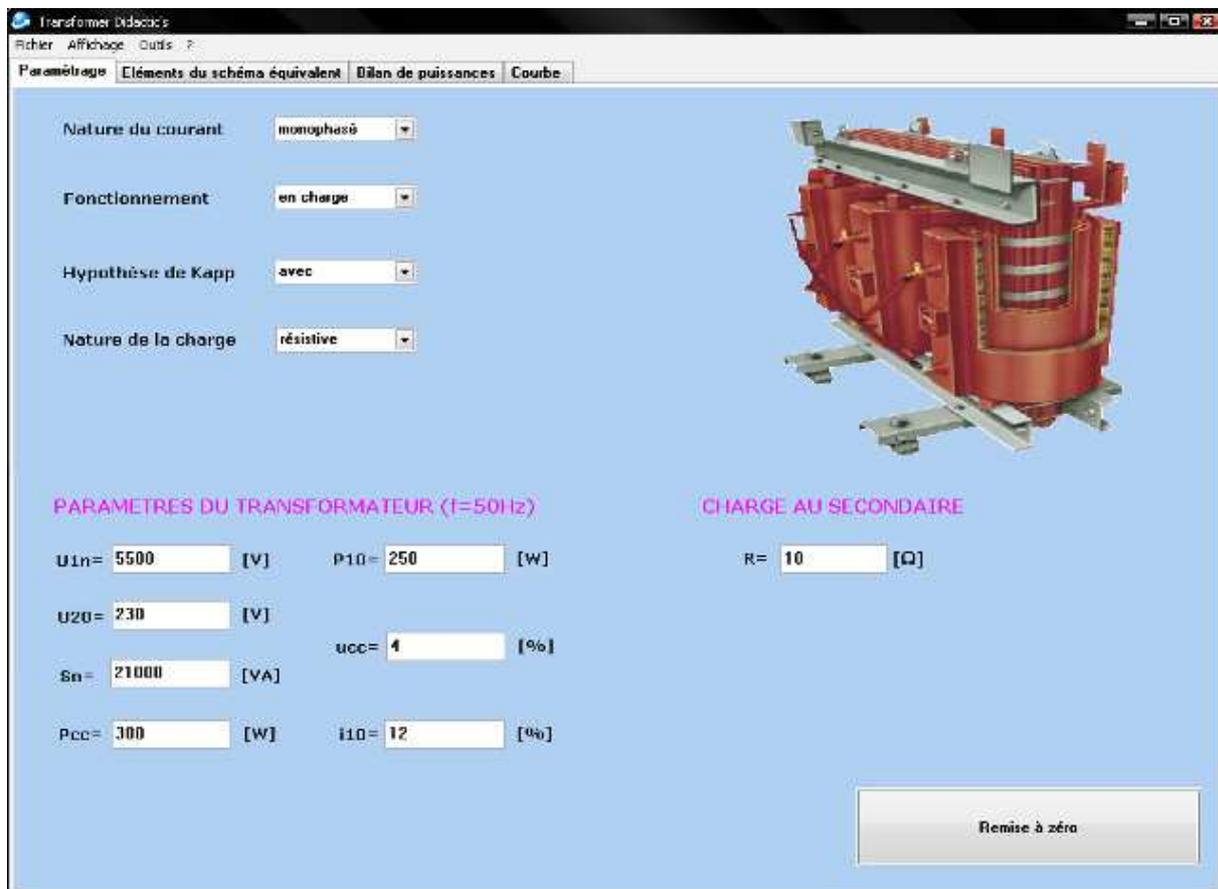
Comme nous le voyons sur la figure 5.17, Transformer Didactic's contient cinq grands chapitres dont :

- Les circuits magnétiques des transformateurs ;
- Les circuits magnétiques des transformateurs ;
- Le transformateur monophasé ;
- Le transformateur triphasé ;
- Les transformateurs spéciaux.

Après chaque chapitre, des exercices ont été proposés et les corrigés seront présentés à la fin.

Signalons qu'un rappel sur l'opération de nombre complexe et sur l'électromagnétisme est donné auparavant car c'est indispensable pour la bonne compréhension du fonctionnement du transformateur.

- Si on clique sur le bouton , l'interface réservée pour les essais d'un transformateur et elle se présente comme suit :



**Figure 5.18** : Onglet « Paramétrage »

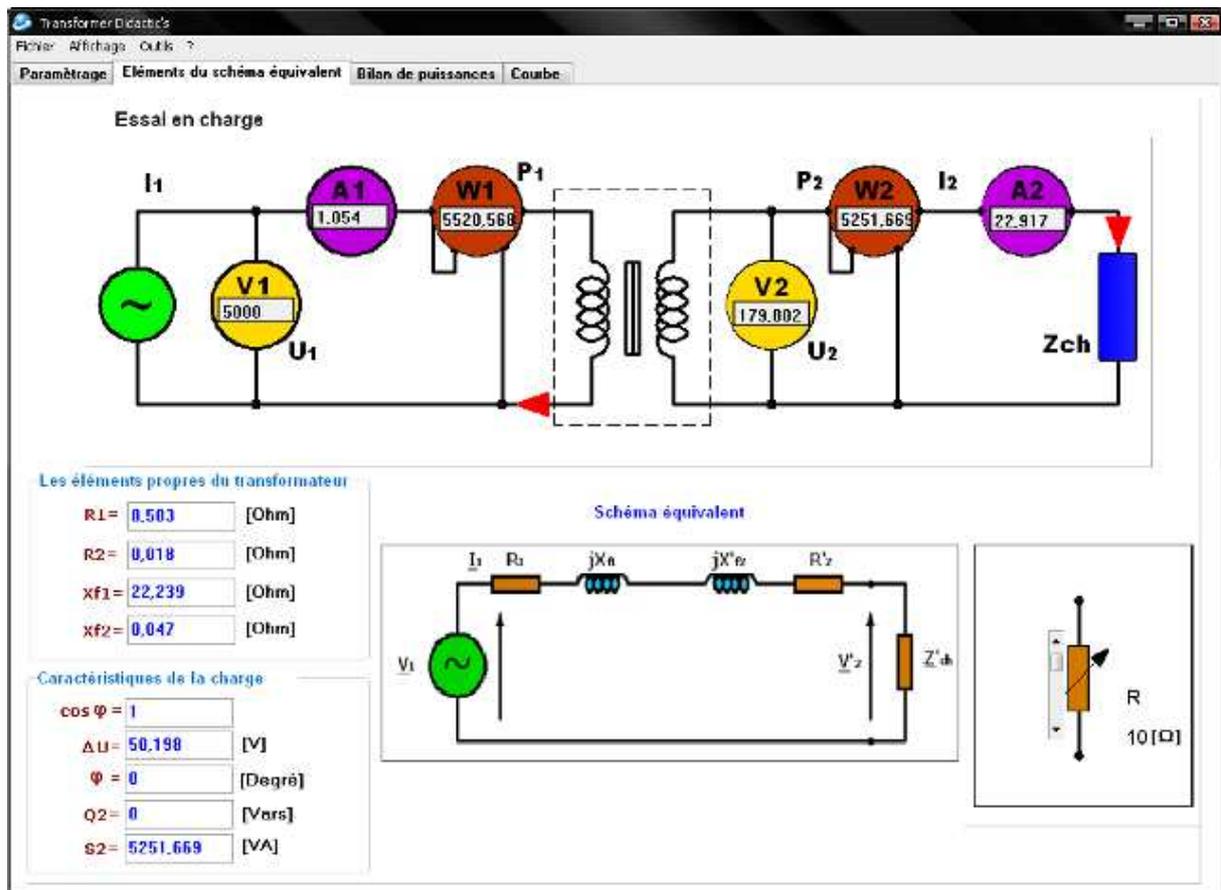
Cette interface comporte trois onglets dont l'onglet « Paramétrage », l'onglet « Élément du schéma équivalent », et l'onglet « Bilan de puissance ».

Le premier, c'est-à-dire l'onglet « Paramétrage » est enfoncé par défaut comme on le voit sur la Figure 1.18 : c'est dans cet onglet qu'on doit saisir les paramètres du transformateur à étudier tels que les tensions, puissances, etc....et ainsi celle de charge, et aussi de faire le choix sur le fonctionnement du transformateur, la charge qu'il porte. Il porte aussi un bouton d'initialisation.

NB : Les valeurs à entrer sont des valeurs réelles mais non pas en valeurs relatives.

Une fois tous les éditeurs remplis, on peut cliquer sur l'onglet « Élément du schéma équivalent », mais comme dans notre cas ici, le cas par défaut, on peut cliquer directement sur l'onglet « Élément du schéma équivalent ».

La fenêtre va prendre la forme suivante :



**Figure 5.19 :** Onglet « Elément du schéma équivalent »

C'est dans cet onglet que s'affichent les résultats donnés par le calcul des éléments du schéma équivalent tels que courants, tensions, facteur de puissance et les composantes de puissance de la charge ainsi que le schéma équivalent lui-même.

Sur cet onglet :

- ✚ On voit un curseur qui a pour rôle de varier la charge, pour notre cas ici, cas d'une charge résistive pure, il n'y a qu'un curseur mais pour une charge composée de deux éléments comme celle d'une résistive en série avec un condensateur, ils seront deux.
- ✚ Un bouton  /  pour arrêter/activer la circulation du courant.

La vitesse du sens de courant augmente lorsque la charge appelle une puissance active et s'affaiblit quand la charge diminue. Le but de cette simulation de la circulation du courant est de montrer à ceux qui vont utiliser ce didacticiel que la puissance de charge est fonction du courant.

Le troisième onglet, « Bilan de puissance », comme son nom l'indique affiche le bilan énergétique du transformateur, celle de la puissance qu'il absorbe au réseau, les pertes durant la transformation et celle fournie à la charge ainsi le rendement énergétique.

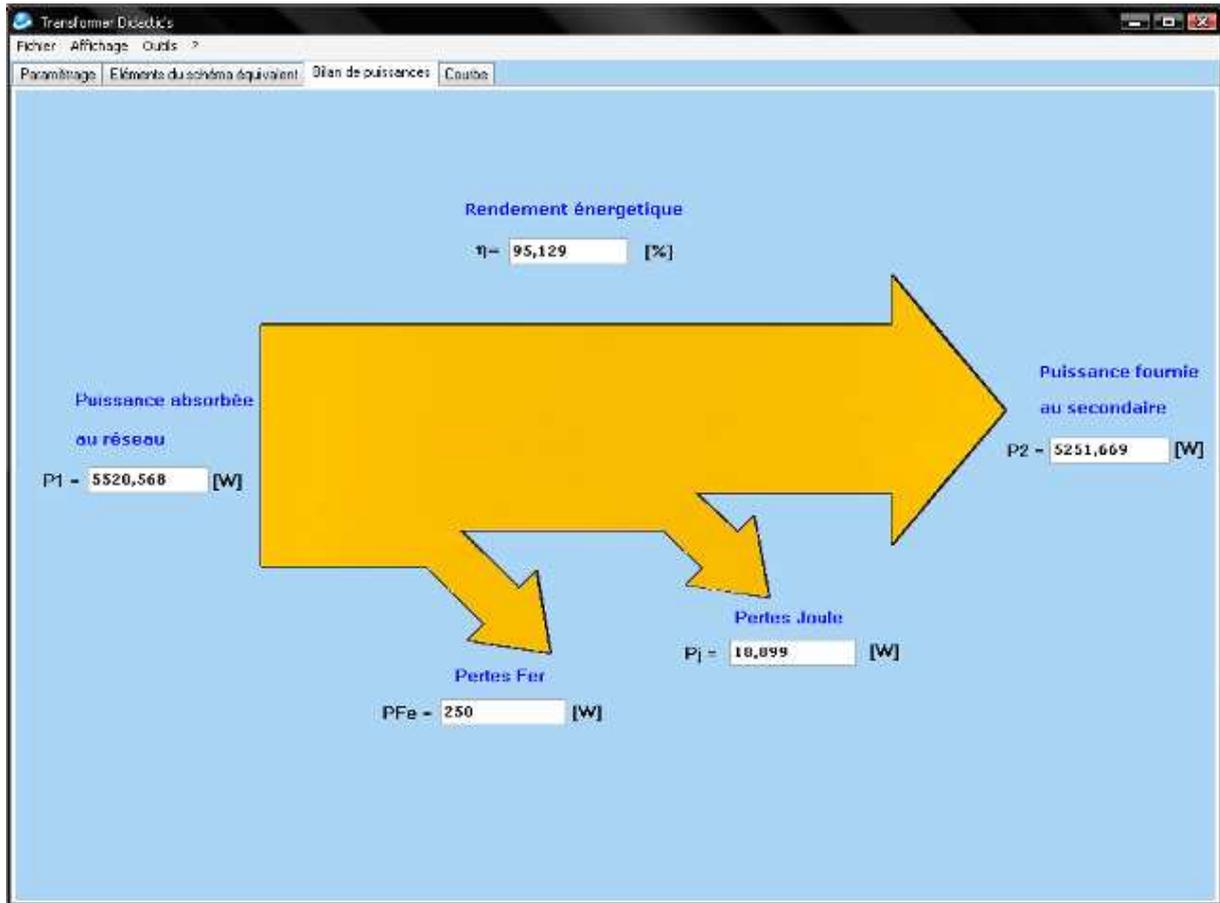


Figure 5.20 : Onglet « Bilan énergétique »

### 5.3.2 Particularité de Transformer Didactic's

Transformer Didactic's a un point particulier sur le mode d'affichage, un affichage en valeur réelle et un autre en valeur relative. Le but est d'évaluer de l'affichage en valeur relative est d'évaluer les courants, tensions et puissances par rapport à la nominale.

## Chapitre 6 : ESSAI ET VALIDATION

### 6.1 Généralité

Ce chapitre nous permet de vérifier les études théoriques que nous avons établies dans la première partie et de valider le logiciel. Pour cela, nous allons faire des calculs à la main, étape par étape et nous les comparerons avec les résultats donnés par le logiciel qu'on venait de concevoir.

### 6.2 Essai

Pour faciliter la validation, nous allons prendre le cas d'un transformateur monophasé suivant :

La puissance apparente d'un transformateur monophasé 5,0 kV / 230 V ; 50 Hz est  $S = 21$  kVA.

L'essai à vide a donné les résultats suivants :

$$U_1 = 5\,000\text{ V}; U_{20} = 230\text{ V}; I_{10} = 0,12\text{ I}_{1n}\text{ et }P_{10} = 250\text{ W}.$$

L'essai en court-circuit a donné les résultats suivants :

$$P_{1CC} = 300\text{ W et }U_{1CC} = 200\text{ V}.$$

1. Quel est le facteur de puissance à vide de ce transformateur ?
2. Déterminer les éléments du schéma équivalent à vide de ce transformateur.
3. Déterminer les éléments  $R_{cc}$ ;  $Z_{cc}$  et  $X_{cc}$  du schéma équivalent en court-circuit.
4. On branche au secondaire de ce transformateur une charge composée d'une résistance de  $58\ \Omega$  et une inductance de  $35\text{ mH}$  montée en série.

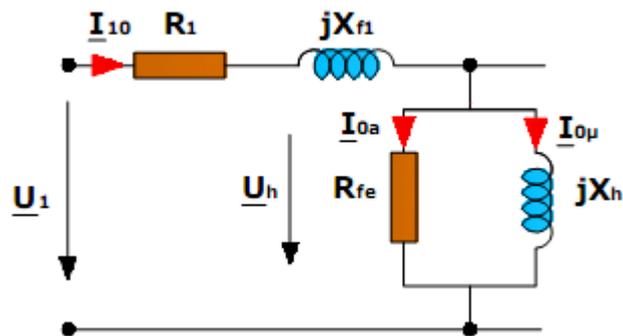
Calculer le courant, le facteur de puissance de la charge ainsi que la tension à ses bornes, puis la puissance qu'elle consomme et déterminer le rendement énergétique en utilisant l'approximation de Kapp.

1. Calcul du rapport de transformation  $\ddot{u}$  :

$$\ddot{u} = \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{5000}{230} = 21,74$$

## 2. Calcul des éléments du schéma équivalent à vide :

Le schéma équivalent correspondant est le suivant :



**Figure 6.1:** Schéma équivalent lors de l'essai à vide

$$I_{1n} = \frac{S_n}{U_1} = \frac{21000}{5000} = 4,2 \text{ [A]}$$

$$I_{10} = 12\% \cdot I_{1n} = \frac{12}{100} * 4,2 = 0,504 \text{ [A]}$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{10}}{U_1 \cdot I_{10}} = \frac{250}{5000 * 0,504} = 0,099$$

$$I_{0a} = I_{10} \cdot \cos \varphi_0 = 0,504 * 0,099 = 0,049 \approx 0,05 \text{ [A]}$$

$$I_{0r} = \sqrt{I_{10}^2 - I_{0a}^2} = \sqrt{0,504^2 - 0,05^2} = 0,5 \text{ [A]}$$

$$R_{Fe} = \frac{P_{Fe}}{I_{10}^2} = \frac{250}{0,504^2} = 984,18 \text{ [\Omega]}$$

$$X_h = \frac{U_1}{I_{0r}} = \frac{5000}{0,5} = 10000 \text{ [\Omega]}$$

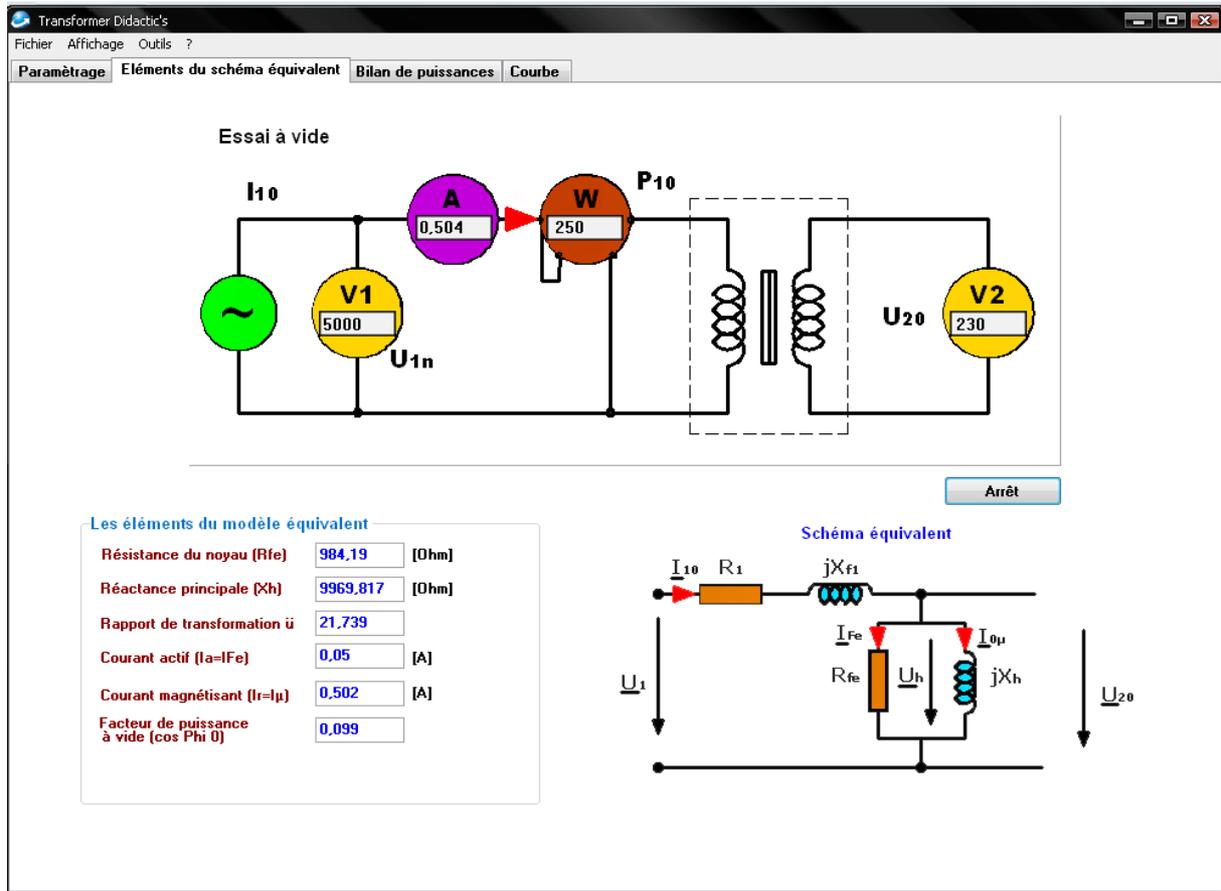


Figure 6.2 : Résultat donné par « Tranformer Didactic's » lors de l'essai à vide

3. Calcul des éléments du schéma équivalent en court-circuit :

La figure qui suit représente le schéma équivalent d'un transformateur lors d'un essai en court-circuit

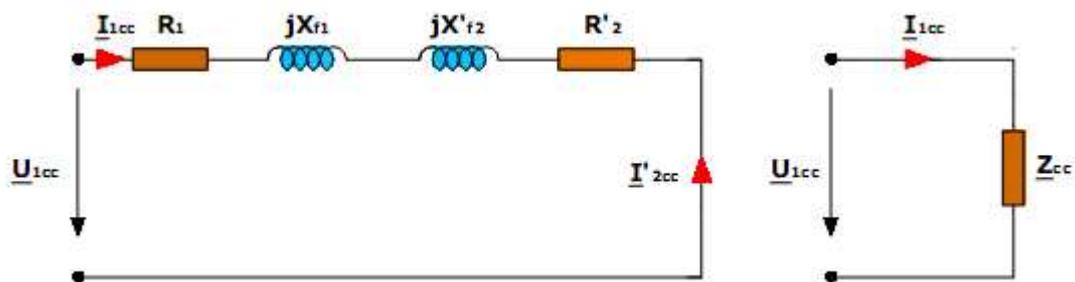


Figure 6.3 : Schéma équivalent lors de l'essai en court-circuit

En court-circuit  $I_{1cc} = I_{1n}$  ;

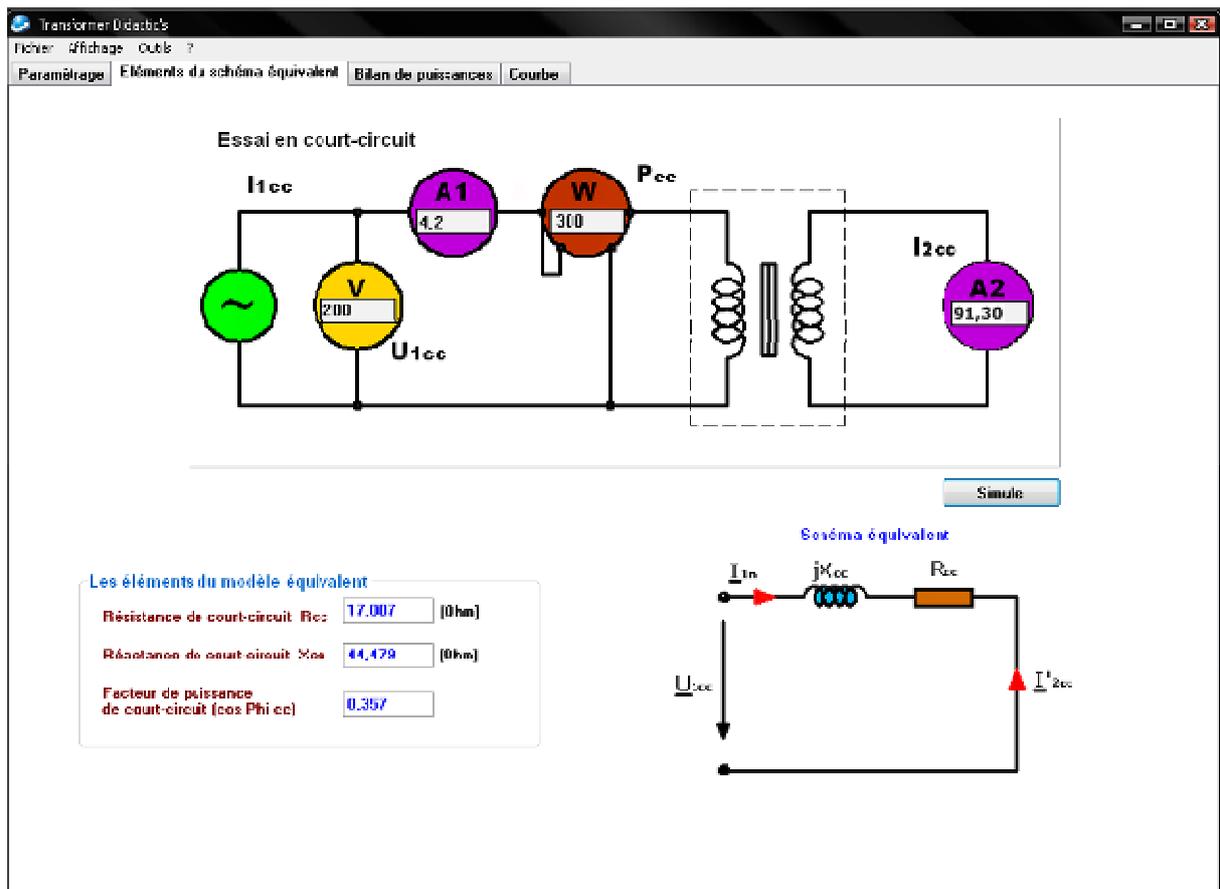
$$I_{2cc} = I_{1cc} \cdot \ddot{u} = 4,2 \cdot 21,74 = 91,308 \text{ [A]}$$

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{1cc}}{U_{1cc} \cdot I_{1cc}} = \frac{300}{200 \cdot 4,2} = 0,357 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$Z_{cc} = \frac{U_{cc}}{I_{1cc}} = \frac{200}{4,2} = 47,62 \text{ } [\Omega]$$

$$R_{cc} = \frac{P_{1cc}}{I_{1cc}^2} = \frac{300}{4,2^2} = 17 \text{ } [\Omega]$$

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2} = \sqrt{47,62^2 - 17^2} = 44,48 \text{ } [\Omega]$$

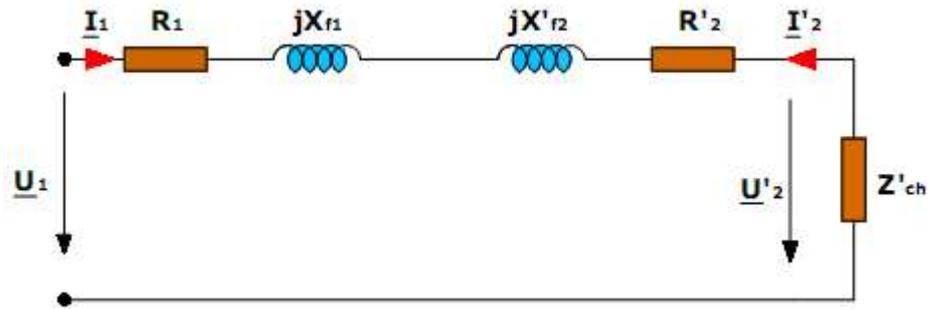


**Figure 6.4 :** Résultat donné par « Tranformer Didactic's » lors de l'essai en court-circuit

4. Déterminons le facteur de puissance de la charge ainsi que la tension à ses bornes, puis la puissance qu'elle consomme en utilisant l'approximation de Kapp.

Pour faciliter le calcul, on va ramener les grandeurs secondaires au primaire.

D'abord, dessinons le schéma équivalent correspondant à cet effet.



**Figure 6.5 :** Schéma équivalent lors de l'essai en charge en utilisant l'approximation de Kapp

L'impédance équivalente est donnée par :

$$\underline{Z}_{\acute{e}q} = R_{cc} + jX_{cc} + \underline{Z}'_{ch}$$

$$\underline{Z}_{ch} = R + jL\omega = 58 + j11 \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{ch} = |\underline{Z}_{ch}| = 59,03 \text{ } [\Omega]$$

$$\underline{Z}'_{ch} = \ddot{u} \cdot \underline{Z}_{ch} = 27412,4 + j5198,9 \text{ } [\Omega]$$

$$\underline{Z}_{\acute{e}q} = 27429,4 + j5243,38 \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{\acute{e}q} = |\underline{Z}_{\acute{e}q}| = 27926 \text{ } [\Omega]$$

Le courant primaire est :

$$I'_{ch} = I_1 = \frac{U_1}{Z_{\acute{e}q}} = \frac{5000}{27926} = 0,179 \text{ } [\text{A}]$$

Le courant et la tension secondaire valent :

$$I_2 = I_{ch} = \ddot{u} \cdot I'_{ch} = 21,74 * 0,179 = 3,891 \text{ } [\text{A}]$$

$$U_2 = Z_{ch} \cdot I_2 = 59,03 * 3,891 = 229,68 \text{ } [\text{V}]$$

$$\Delta U = U_{20} - U_2 = 230 - 229,68 = 0,32 \text{ } [\text{V}]$$

Dans la construction des transformateurs, on adopte que :

$$X_{f1} = X_{f2}' \text{ et } X_{cc} = X_{f1} + X_{f2}'$$

d'où :

$$X_{f1} = X_{f2}' = \frac{X_{cc}}{2} = \frac{44,48}{2} = 22,24 \text{ } [\Omega]$$

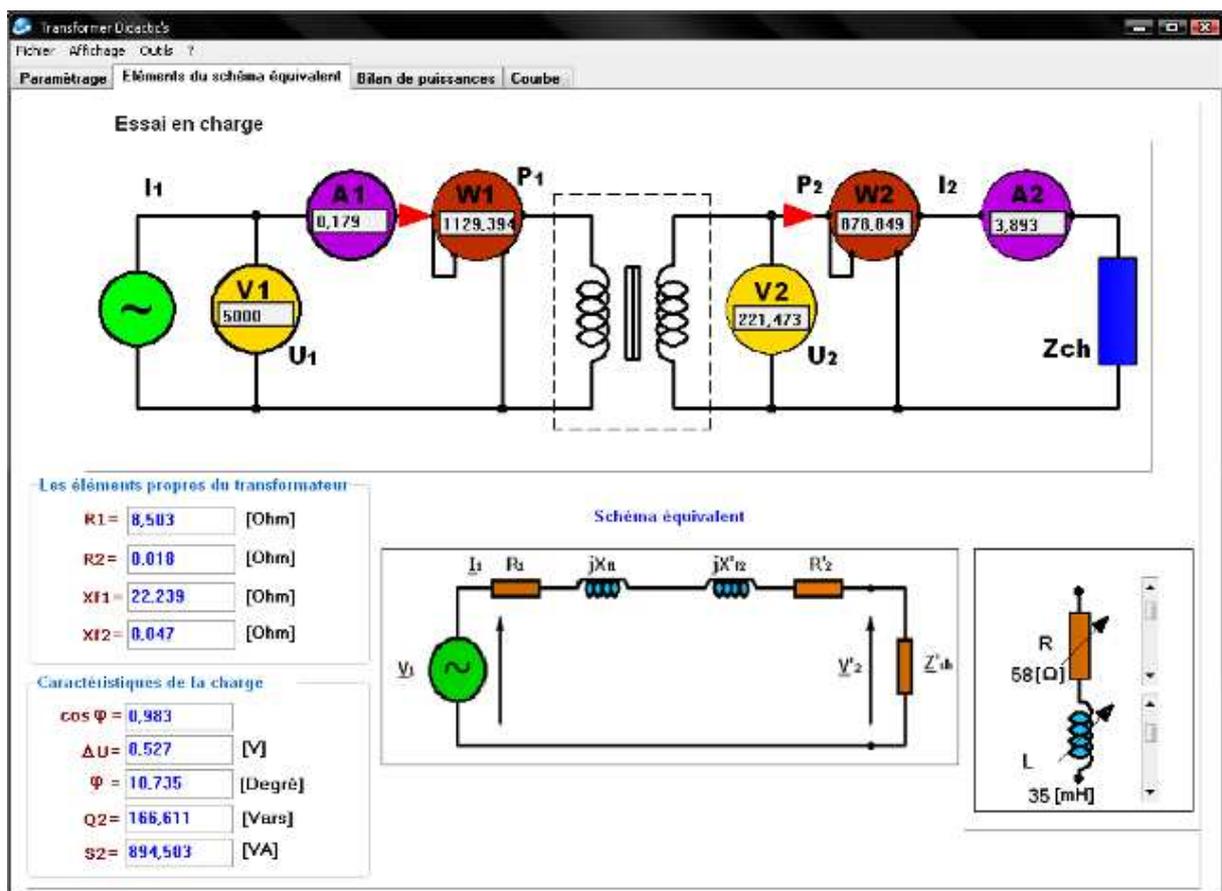
$$X_{f2} = X_{f2}' / i^2 = 22,24 / 21,74^2 = 0,047 \text{ } [\Omega]$$

$$R_1 = R_2' = \frac{R_{cc}}{2} = \frac{17}{2} = 8,5 \text{ } [\Omega]$$

$$R_2 = R_2' / i^2 = 8,5 / 21,74^2 = 0,018 \text{ } [\Omega]$$

La puissance consommée par la charge :

$$P_2 = R_{ch} * I_2^2 = 58 * 3,891^2 = 878,11 \text{ } [W]$$



**Figure 6.6** : Résultat donné par « Tranformer Didactic's » lors de l'essai en charge

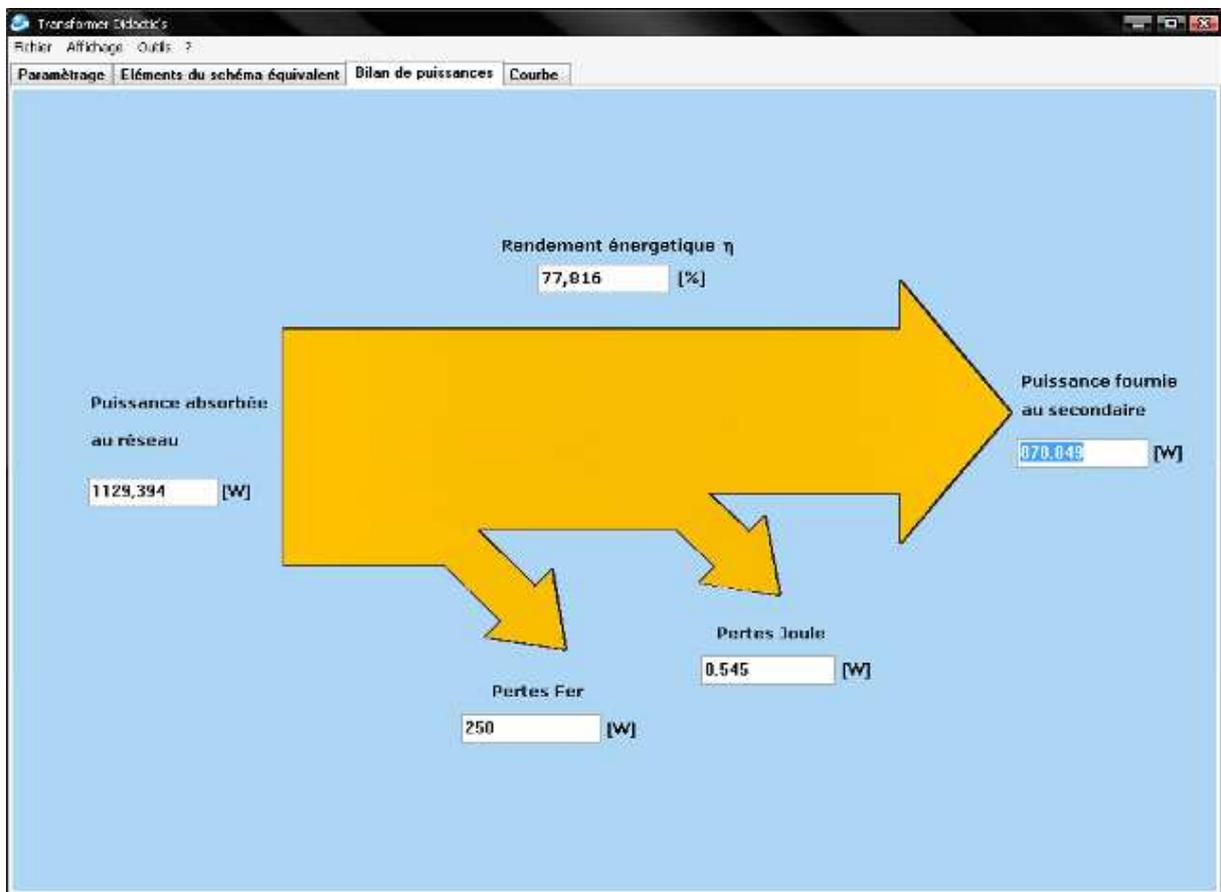
Le rendement énergétique est :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum \text{Pertes}} = \frac{P_2}{P_2 + P_{cc} + P_{Fe}}$$

$$P_{cc} = R_{cc} \cdot I_1^2 = 17 \cdot 0,179^2 = 0,545 \text{ [W]}$$

$$\eta = \frac{878,11}{878,11 + 0,545 + 250} = 0,778$$

$$\eta = 77,8\%$$



**Figure 6.7 :** Résultat donné par « Tranformer Didactic's » pour le bilan de puissance

### **6.3 Interpretations**

En comparant les résultats donnés par le calcul fait à la main et ceux du Transformer Didactic's, on peut dire que les valeurs obtenues sont très proches, la différence peut être engendrée par l'approximation. Donc on peut conclure que le programme est bien conçu ; du point de vue pratique, et prêt à exploiter comme un outil didactique de simulation d'un transformateur.

## Chapitre 7 : IMPLICATION PEDAGOGIQUE

### 7.1 Introduction

Notre école, l'Ecole Normale Supérieure pour l'Enseignement Technique est une grande école dont son rôle principal est de former les étudiants pour être un professeur. C'est le cas que l'on ne pouvait pas négliger le côté didactique.

C'est pour cela que ce présent travail de mémoire comprend des éléments de programme qu'on pourrait enseigner au sein du Lycée Technique et Professionnel (LTP) voire même à l'université. Parmi ces programmes, en voici quelques thèmes pédagogiques qu'on peut tirer :

| THEMES                       | CLASSE                  | MATIERES     |
|------------------------------|-------------------------|--------------|
| Le transformateur            | 3è Année TMEL           | Technologie  |
| Le langage HTML              | 2è Année à l'université | Informatique |
| Architecture des ordinateurs | 1è Année EN             | Informatique |

**Tableau 7.1** : Programme suggéré

Pour bien mener l'enseignement de ce thème, dressons d'abord une fiche pédagogique.

**Thème** : Les transformateurs

**Matière** : Technologie

**Niveau** : Troisième année

**Spécialité** : TMEL (Technicien de Maintenance en Electrotechnique)

**Formation** : FPI (Formation Professionnelle et Initiale)

**Durée** : 8 heures

**Pré-requis** :

- Notion sur les diélectriques, les conducteurs électriques
- Principe de fonctionnement du transformateur acquis en électrotechnique

**Objectif général** : A l'issue de ce sous-module de formation, l'apprenant doit être capable de maîtriser les connaissances technologiques sur les machines électriques à courant alternatif.

**Outils pédagogiques** : Tableau, craies de différentes couleurs (blanc, rouge, bleu,...)

Règle, éponge, ....

Polycopies, etc. ...

## 7.2 Les transformateurs

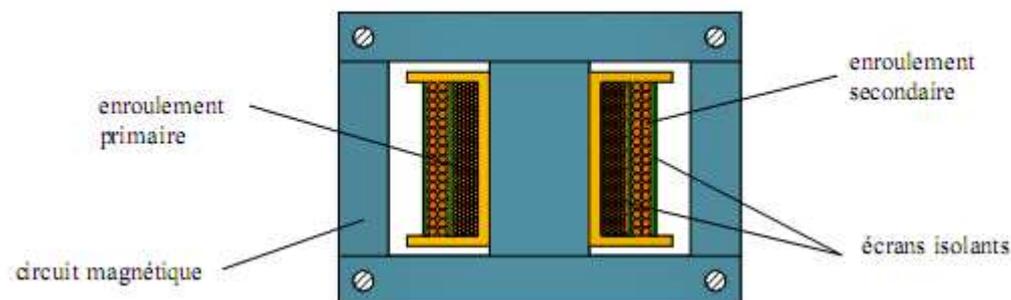
### 7.2.1 Généralité

Les machines électriques statiques ont pour rôles de modifier les caractéristiques de l'énergie électrique, on classe dans cette catégorie les transformateurs de tension et de l'intensité du courant, les redresseurs qui transforme le courant alternatif en courant continu.

Les transformateurs ont pour rôles de modifier l'amplitude d'une tension ou d'un courant alternatif sans nécessiter d'un organe en mouvement d'où le nom « transformateur statique ». Ces appareils sont réversibles et permettent soit d'élever ou d'abaisser le niveau de tension ou du courant pour le transport, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique.

#### ➤ Constitution

En général, un transformateur comporte un circuit magnétique et au moins deux enroulements. Le premier qui, connecté au secteur, est appelé « enroulement primaire » et le second qui délivre le fruit de la transformation est appelé « enroulement secondaire ».



**Figure7.1** : Constitution d'un transformateur

#### Principe de fonctionnement

Lorsqu'on alimente le primaire par une source de tension variable, elle va créer un courant alternatif primaire. Il engendre à son tour dans le circuit magnétique un flux alternatif, qui, induit dans le bobinage secondaire une f.e.m de même forme et de même période que le courant primaire. Il faut donc assurer les fonctions suivantes :

#### Fonction magnétique

- La création d'un flux alternatif est assurée par l'enroulement primaire ;
- Canaliser les lignes de champ à l'aide du circuit magnétique.

#### Fonction électrique

- Recevoir le courant primaire et envoyer le courant secondaire par les bornes et les traversées isolantes ;
- Produire le courant induit par l'enroulement secondaire ;

- Régler la tension à vide par l'ajusteur de tension  $U_0$  et en charge par le régulateur de tension.

### Fonction mécanique

- Supporter les éléments constitutifs et les vibrations lors de différents fonctionnements ;
- Refroidir le transformateur à l'aide du système de refroidissement (air, gaz, huile, ailettes...);
- Maintenir la fixation et le levage, assuré par le chariot aux galets de roulements et les anneaux de levage ;
- Maintenir l'entretien, c'est la fonction des dispositifs de vidange et de remplissage.

#### ➤ Classification des transformateurs

On classe les transformateurs d'après :

- L'emploi : puissance, mesure ;
- La nature du courant : monophasé ou triphasé ;
- Le mode de refroidissement : naturel ou forcé ; dans l'air, dans l'huile, dans un gaz.
- Maintenir l'entretien, c'est la fonction des dispositifs de vidange et de remplissage.

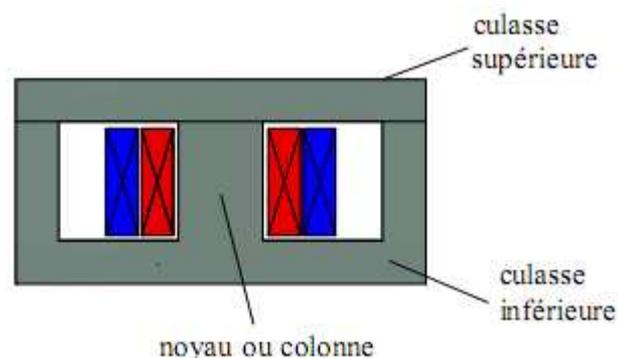
### 7.2.2 Circuit magnétique

#### ➤ Rôle

Sa fonction principale est de canaliser le flux produit par l'enroulement primaire.

#### ➤ Constitution

Le circuit magnétique comporte un certain nombre de noyaux ou colonnes réunies par deux culasses



**Figure 7.2 :** Constitution du circuit magnétique

➤ **Conditions à remplir**

**Réduction de poids**

Choix des tôles de haute perméabilité ( $\mu$ ) pour avoir une induction élevée, serrage énergétique des tôles pour réduire le froissement.

**Réduction des pertes**

Emploi de noyau et de culasse feuilletés (utilisation de tôles de faibles pertes (alliages de fer-cobalt))

**Facilité de refroidissement**

Aménagement des canaux pour la circulation de réfrigérants.

➤ **Tôles utilisées**

**Tôles laminées à chaud**

Elles représentent un niveau de pertes de 0,93 à 1,6 W/kg pour une induction de 1T, avec une épaisseur de 0,35 mm. L'isolement des tôles est en vernis. Ce type de tôles est utilisé pour un transformateur de faible puissance.

**Tôles laminées à froid dites aussi à « cristaux orientés »**

Le niveau de pertes est de 0,33 W/kg, avec une épaisseur de 0,35 mm. Elles sont recouvertes sur les deux faces avec une fine couche d'isolement inorganique. L'induction peut atteindre jusqu'à 2,3 T. Elles trouvent son application dans la fabrication des transformateurs de puissance.

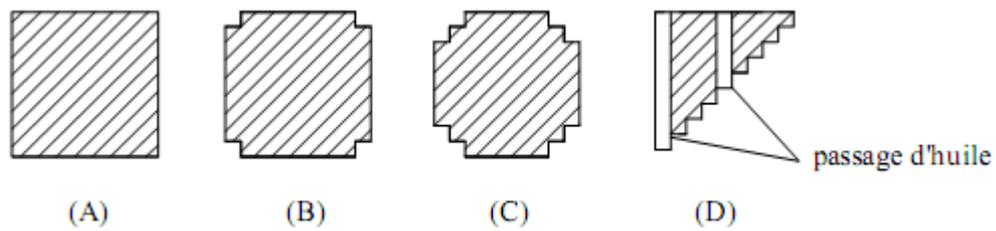
➤ **Colonnes**

Les colonnes portent les bobinages. Elles se diffèrent par leur forme de section.

- Section carrée (A)
- Section en gradin (B) et (C)

La plus simple est la section carrée (A), facile à obtenir.

Les sections en un ou deux gradins (B) et (C) sont satisfaisantes pour les transformateurs de faible puissance de quelque kVA, mais lorsque la puissance augmente, on multiplie le nombre de gradins (D) et on prévoit des canaux pour la circulation des fluides de refroidissement.



**Figure7.3 :** Différentes formes de colonnes

- (A) : Section carrée ;
- (B) : Section en un gradin ;
- (C) : Section en deux gradins ;
- (D) : Section en gradins fins à canaux de circulation d'huile.

### ➤ Culasse

#### Section

Les culasses ne portent pas de bobines, il n'est pas nécessaire que sa section soit inscrit dans un cercle.

#### Serrage

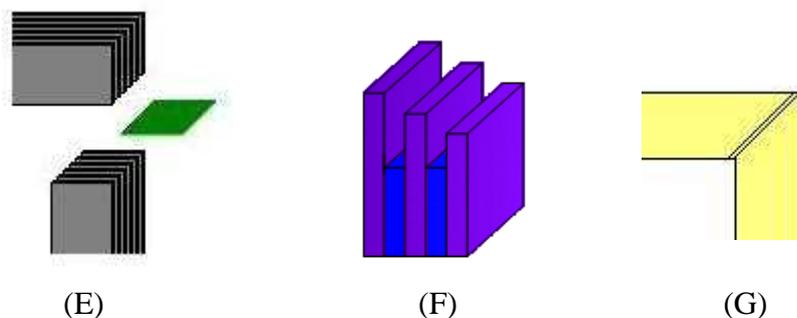
Le serrage s'effectue par boulon mais on utilise un presspahn pour isoler le circuit magnétique. Pour les transformateurs de puissance importante, le serrage par boulon n'est plus pratique mais on utilise un étrier.

### ➤ Joints

Ils jouent le rôle de raccord entre les colonnes et les culasses.

On distingue trois sortes de joints pour le raccord de colonnes et culasses d'un transformateur, ce sont :

- Joint plat (E) ;
- Joint enchevêtré (F) ;
- Joint à coupe oblique (G).



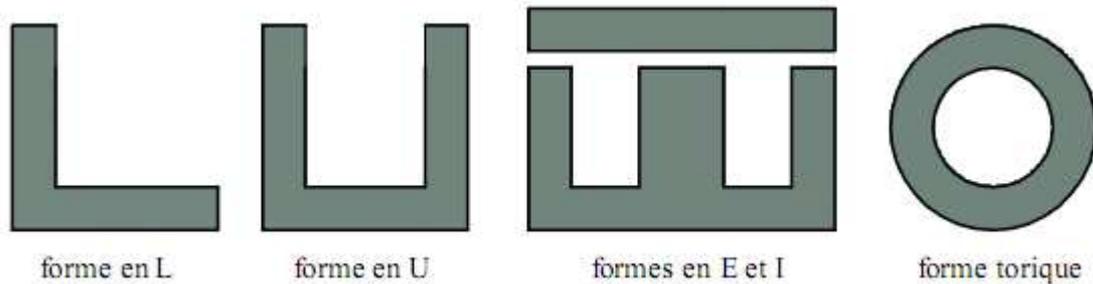
**Figure7.4 :** Différentes sortes de joints pour le raccord de colonne et culasse d'un transformateur

### ➤ **Forme et disposition du circuit magnétique**

#### **Forme**

Pour les deux types de traitement de tôles citées plus haut, on obtient un mince ruban d'épaisseur  $30\mu\text{m}$ , on réalise ensuite soit des profils découpés qui seront empilés et imprégnés, soit des circuits enroulés et imprégnés. Les formes obtenues sont les suivantes

- pour les tôles prédécoupées : forme en L, U, E et en I;
- pour les tôles enroulées : tores, circuits roulés.

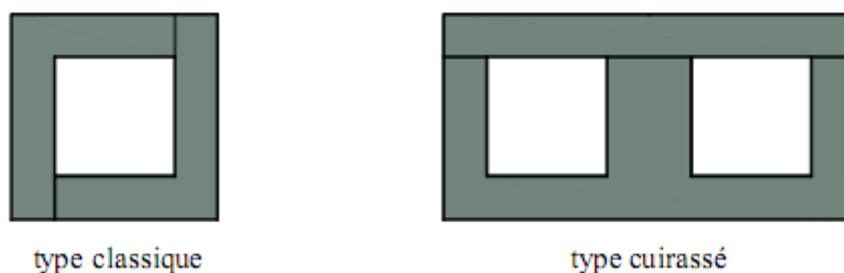


**Figure7.5 :** Différentes formes du circuit magnétique

#### **Disposition**

- **Transformateur monophasé :**

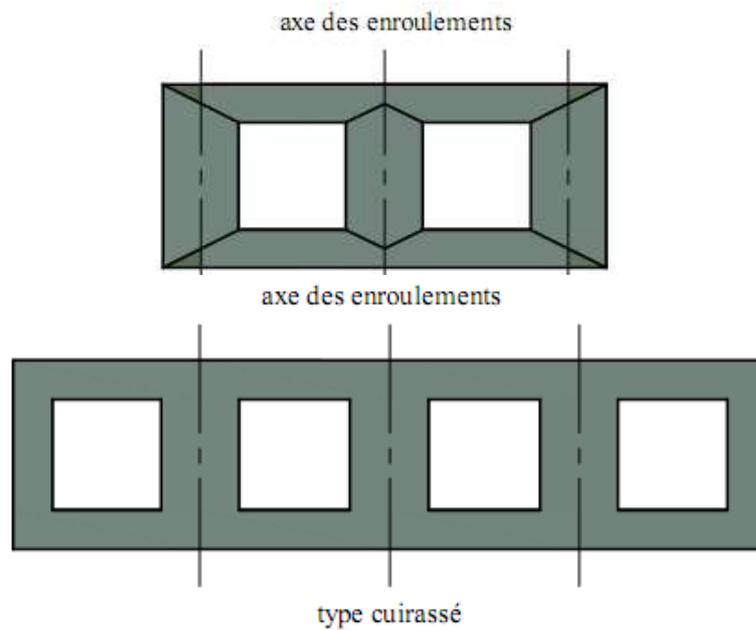
Le circuit magnétique comporte deux colonnes et deux culasses pour le petit transformateur et pour le gros transformateur, le circuit magnétique est général cuirassé avec colonne centrale bobinée.



**Figure7.6 :** Disposition du circuit magnétique d'un transformateur monophasé

- **Transformateur triphasé :**

On utilise trois colonnes réunies par deux culasses. Le type cuirassé comporte cinq colonnes et deux culasses.



**Figure 7.7 :** Disposition du circuit magnétique d'un transformateur triphasé

### 7.2.3 Organes électriques

#### ➤ Enroulements

Les enroulements des transformateurs sont réalisés soit en cuivre soit en aluminium. Les bobinages sont effectués avec du fil rectangulaire isolé papier en multicouches, en disque ou hélicoïdal pour les gros transformateurs et en fil émaillé de diamètre allant de 20  $\mu\text{m}$  à plusieurs millimètres pour les faibles puissances. Généralement, les transformateurs équipés d'un régleur en charge sont pourvus d'un enroulement de réglage séparé.

#### Disposition

##### - Enroulement concentrique simple (H)

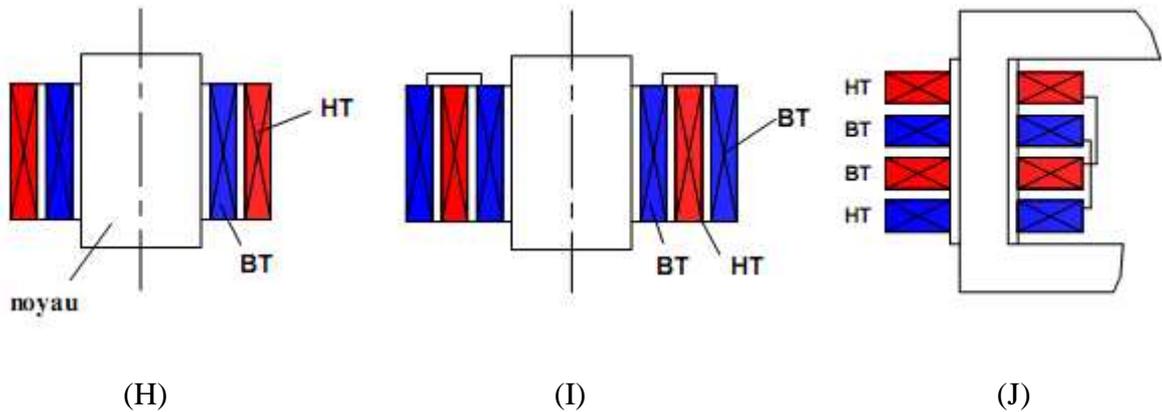
L'enroulement BT (basse-tension) étant bobiné le premier, c'est-à-dire autour de la colonne; puis on bobine le second enroulement (HT), ce dernier se trouve à l'extérieur de l'enroulement BT.

##### - Enroulement biconcentrique (I)

La bobine HT étant placée entre deux bobines BT. On trouve ce type de bobinage dans le transformateur de puissance.

##### - Enroulement alterné (J)

Les enroulements sont réalisés sous forme de galettes que l'on monte alternativement.



**Figure 7.8 :** Disposition des enroulements d'un transformateur

### ➤ Couplage

Comme tout système triphasé, les enroulements primaires (HT) d'un transformateur triphasé peuvent être reliés en étoile ou en triangle. La lettre symbolisant le couplage est en majuscule : soit D pour le couplage triangle, et Y pour le couplage étoile.

Les enroulements secondaires (BT) peuvent être aussi montés en étoile, en triangle ou en zig-zag. La notation du type de branchement est en lettres minuscules : soit 'y' pour étoile, 'd' pour triangle et 'z' pour le zig-zag.

La connexion des deux enroulements est énoncé dans l'ordre de HT et BT suivi de l'indice horaire, par exemple Yd11.

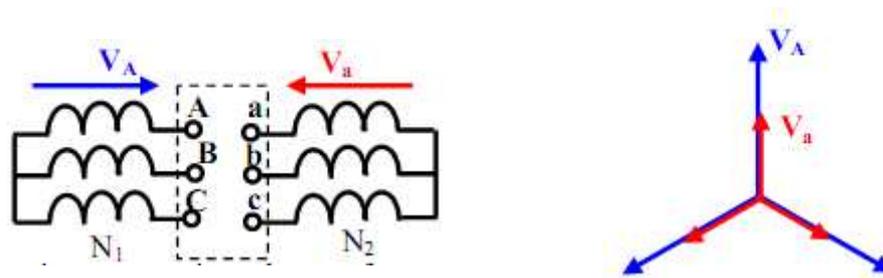
### Le diagramme vectoriel

Le diagramme vectoriel est obtenu en superposant le point neutre commun aux deux étoiles ou en centrant le triangle sur le centre de l'étoile. La première phase A de la bobine HT est placée verticalement et dirigée vers le haut sur le cadran d'une horloge et l'extrémité de ce vecteur marquera le midi ou zéro heure, d'où le nom d'« indice horaire ». En posant  $\theta = (U_{an}, \hat{U}_{AN})$ , l'indice horaire, c'est le retard de la tension  $\vec{U}_{an}$  côté BT par rapport à la tension simple homologue  $\vec{U}_{AN}$  côté HT. C'est un nombre entier n tel que  $\theta = n \frac{\pi}{6}$  ; avec  $\theta > 0$ .  $\theta$  varie de 0 à 330°, donc n varie de 0 à 11.

**Exemple :**

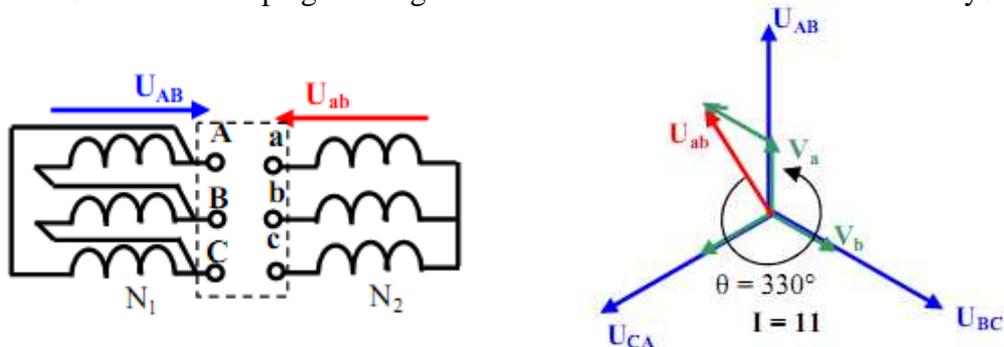
Représentons le schéma de connexion et le diagramme vectoriel

Yy0



**Figure7.9 :** Schéma de couplage et diagramme de tensions d'un transformateur Yy0

Dy11



**Figure7.10 :** Schéma de couplage et diagramme de tensions d'un transformateur Dy11

➤ **Isolation**

Il est nécessaire d'isoler les conducteurs entre eux et les bobines par rapport à la masse (circuit magnétique, cuve, couvercle) en utilisant des vernis, papiers, coton, etc....L'isolement de l'enroulement HT par rapport à celle du BT s'effectue par l'utilisation d'écran isolant et des diélectriques imprégnés.

**Ecrans**

- **Sens radial**

Il faut disposer l'écran entre le noyau et le bobinage BT puis le bobinage BT et HT et les colonnes voisines.

- **Sens axial**

Il faut isoler les galettes entre elles et l'ensemble de bobines par rapport aux culasses.

**Diélectriques**

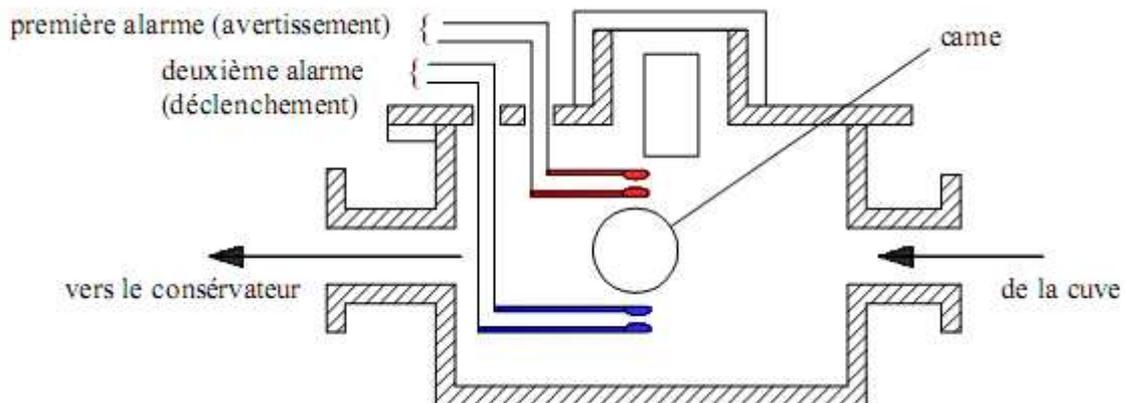
Ils doivent pouvoir de circuler les fluides (air, huile, diélectrique chlorés) ou un incombustible « sable de quartz ». Le sable de quartz étouffe la flamme mais difficile à refroidir.

## Traversées

Les traversées isolantes ont pour rôle d'assurer la liaison électrique entre les extrémités des enroulements (primaire, secondaire) d'une part et les lignes d'arrivée d'autre part à travers les couvercles.

## Protection électrique

Elle est assurée par un relais Bucholz.



**Figure7.11** : Schéma de principe du relais Bucholz

## Principe de fonctionnement

En cas de défaut, une partie de l'huile se décompose en gaz. Ce dernier se dégage en traversant le relais Bucholz. Si le dégagement est faible, c'est que le défaut est peu important, le flotteur supérieur seul descend ce qui entraîne la fermeture du contact de la première alarme. En cas d'accident grave, le volume de gaz dégagé est important, l'huile est expulsée et le flotteur inférieur descend, ce qui provoque le déclenchement du disjoncteur et met hors tension le transformateur.

### 7.2.4 Organes mécaniques

Pendant le fonctionnement d'un transformateur, de la chaleur s'accumule à la fois dans le noyau et les enroulements. Cette chaleur représente les « pertes » d'un transformateur et ces pertes augmentent de façon exponentielle à mesure que la charge dans le transformateur augmente. Il est donc essentiel de dissiper cette chaleur, surtout dans les conditions de charge plus élevée. Pour ces raisons, la performance du système de refroidissement du transformateur, y compris celle du fluide, est très importante.

### ➤ Mode de refroidissement

#### Refroidissement par l'air :

Le renouvellement s'effectue naturellement par courant de convection et de ventilation forcée.

**Refroidissement indirect par l'air ou par l'eau :** Avec fluide intermédiaire, on utilise le fluide isolant : L'huile dans laquelle la partie active est plongée. Ce fluide circule en circuit fermé dans la cuve :

- soit naturellement par courant de convection ou à l'aide de motopompe.
- soit à travers les parois de la cuve : muni d'ailettes pour augmenter la surface de contact, la circulation d'air étant naturelle.
- soit à travers les parois de radiateur : munie la cuve, la circulation de l'air étant naturelle ou activée par des ventilateurs.
- soit à travers les parois d'un aérorefrigerant : avec circulation forcée de l'huile et de l'air.

Le type de refroidissement d'un transformateur est désigné par une suite de quatre lettres en majuscule.

Le tableau suivant englobe les principaux modes de refroidissement d'un transformateur.

| 1 <sup>ère</sup> lettre |                     | 2 <sup>e</sup> lettre               |                                      | 3 <sup>e</sup> lettre     |                     | 4 <sup>e</sup> lettre         |         |
|-------------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|
| Nature du diélectrique  |                     | Mode de circulation du diélectrique |                                      | Fluide de refroidissement |                     | Mode de circulation du fluide |         |
| <b>O</b>                | Huile minérale      | <b>N</b>                            | Naturel                              | <b>O</b>                  | Huile minérale      | <b>N</b>                      | Naturel |
| <b>L</b>                | Diélectrique chloré | <b>F</b>                            | Forcé                                | <b>L</b>                  | Diélectrique chloré | <b>F</b>                      | Forcé   |
|                         |                     | <b>D</b>                            | Forcé et dirigé dans les enroulement |                           |                     |                               |         |
| <b>G</b>                | Gaz                 |                                     |                                      | <b>G</b>                  | Gaz                 |                               |         |
| <b>A</b>                | Air                 |                                     |                                      | <b>A</b>                  | Air                 |                               |         |
| <b>S</b>                | Isolant solide      |                                     |                                      | <b>S</b>                  | Isolant solide      |                               |         |

**Tableau 7.2 :** Principaux modes de refroidissement d'un transformateur

### ➤ Exemple d'application

Prenons comme exemple un transformateur dont le type de refroidissement est ONAN.

D'après le tableau,

ONAN veut dire : Transformateur immergé dans l'huile, à circulation naturelle, refroidie par air à ventilation naturelle.

### ➤ Cuve et couvercle

La cuve sert de support du circuit magnétique et des bobinages. Elle contient les diélectriques et assure la protection mécanique, la manutention et le déplacement de l'appareil.

Le couvercle ferme la cuve, il porte les traversées isolantes, les anneaux ou crochets de manutention et la plaque signalétique.

Le couvercle et la cuve devront avoir une bonne tenue mécanique (rigidité, étanchéité, surface de contact de l'air).

La cuve et le couvercle sont en tôles épaisses.

On distingue trois différents types de cuve, à savoir :

- Cuve à ailettes : la paroi assure le refroidissement
- Cuve à radiateur : le refroidissement est assuré par le radiateur en tôle.
- Cuve à cloche : le couvercle est en forme de cloche, le couvercle est plat sauf pour le transformateur à cuve à cloche.

### ➤ Principaux paramètres de la plaque signalétique

|  |  |
|--|--|
| La puissance apparente ou assignée S, elle s'exprime en Voltampère<br>$S = \sqrt{3}.U.I$ | Tension de court-circuit : $UCC \% = 100U_{1CC}/U_1$ |
|  | Réglage hors tension                                 |
|  | Couplage   |
|  | Diélectrique   |
| Fréquence  | Classe thermique et échauffement                     |
| Tension et intensité au primaire   | Refroidissement                                      |
| Tension et intensité au secondaire   | Technologie diélectrique : sec enrobé ou immergé     |

**Tableau 7.3 :** Principaux paramètres de la plaque signalétique

### 7.2.5 Exercices d'application

1. Qu'appelle t- on tôle à cristaux orientés ?
2. Pourquoi le circuit magnétique d'un transformateur est-il feuilleté ?
3. Quels sont les causes de bruits dans un transformateur ?
4. Quels sont les inconvénients de l'échauffement d'un transformateur.
5. Quelles sont les conditions nécessaire et suffisante pour la mise en parallèle de deux transformateurs triphasés.
6. La plaque signalétique d'un transformateur triphasé est donnée dans la figure qui suit.

| T&D                                      |          |             |      |            |                         |                    |        |
|--|----------|-------------|------|------------|-------------------------|--------------------|--------|
| TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ - 50 Hz SE.02839 |          |             |      |            |                         |                    |        |
| N°                                       | 146122   | Type        | UTHC | Année      | 1995                    | Niveau d'isolement | 50 kV  |
| Puissance                                | 100      | kVA         |      | Conforme à | UTE                     |                    |        |
| Réf.                                     |          |             |      | Couplage   | Dyn 11                  |                    |        |
|  |          |             |      | Primaire   |                         | Secondaire         |        |
| Tensions                                 | 1        | 20500       | V    |            | V                       | V                  | V      |
|  | 2        | 20000       | V    |            | V                       | 410                | V      |
|  | 3        | 19500       | V    |            | V                       | V                  | V      |
| Remplissage total                        |          | Courants    | 2,89 | A          |                         | A                  | 140,8  |
|  |          | Commutateur |      |            |                         | Ucc                | 4 %    |
| Masse                                    | HUILE 01 |             | 92   | kg         | Nature des enroulements |                    | CUIVRE |
| Masse totale                             |          |             | 440  | kg         | Refroidissement         |                    | ONAN   |

- Que représentent les valeurs 100kVA, 20000V, 410V, 2,89A et 140,8A
- Que signifie Dyn11, donner le schéma de couplage et le diagramme vectoriel correspondant.
- Quelle est la valeur de la tension de court-circuit ?
- Que signifie ONAN puis rappeler le principe du relais Buchholz

### 7.2.6 Suggestion sur l'enseignement du langage HTML à l'ENSET

De nos jours, la technologie est très avancée : beaucoup de service tend à être informatisé. Dans ce travail de mémoire, on a essayé de développer un logiciel pour la simulation d'un transformateur ; on a utilisé beaucoup de langages de programmations.

Plusieurs problèmes ont été rencontrés au niveau de la programmation surtout lors de la création d'une page web qui utilise le langage HTML.

Ainsi, on va porter une suggestion qui porte sur l'enseignement de cette discipline.

Durant nos études universitaires, on enrichisse les cours donnés par les enseignants en consultant l'internet plus précisément les sites web. Mais comment on a créés ces sites web ; par quoi il ont passé pour pouvoir présentés ces sites web.

Ainsi, à l'ENSET, à partir de la deuxième année, les étudiants bénéficient du cours « Informatique ». Dans ce cours, on consacre un chapitre pour développer le langage Pascal et C ; je propose alors d'intégrer dans cette discipline l'introduction du langage HTML.

Evidemment, la conception d'un site web partagé sur internet nécessite plusieurs éléments mais ce qu'on doit apprendre à l'ENSET c'est la base. Par rapport à cette idée de base, à part l'étude théorique, je propose donc de consacrer un peu plus de temps sur les travaux pratiques.

Ainsi en utilisant les cours théoriques donnés aux élèves, je propose de concevoir un exemple de site web qui illustre une présentation de l'ENSET avec ses filières ainsi qu'une petite historique.

**Méthode :**

1. Utiliser les cours de HTML dispensés en classe pour concevoir cet exemple de site web.
2. Au cas où l'étudiant veut porter une amélioration, il peut télécharger des documents sur l'internet car la documentation du langage HTML est gratuit et tellement facile.

**7.2.7 Familiarisation des élèves du lycée à consulter un site web**

Ensuite, nous savons qu'à partir de la quatrième année, dans la discipline didactique de la matière, les étudiants effectuent des simulations de cours dans leur propre classe. Dans la plupart des temps, les étudiants de la PETGE préparent des cours généralement de matière technique du lycée en choisissant un chapitre.

Vue le développement de la technologie, on peut tout trouver sur internet : étude, santé, sociologie, loisirs, actualité, politique... Dans les lycées, certaines disciplines demandent des travaux d'exposé ; ainsi ces élèves doivent se documenter et d'autres ne savent même pas manipuler un ordinateur et ceux qui savent ont de problème à naviguer sur l'internet.

Ainsi, je propose de dispenser une discipline informatique dans les lycées à partir de la classe de Seconde qui consiste quelques cours de manipulation, bureautique et consultation d'un site web. Dans cette dernière, je ne demande pas d'avoir une connexion internet dans les lycées mais c'est au devoir de l'enseignant normalien d'en construire une comme présenté ci-dessus. Voici une séance de travaux pratiques guidés qui illustre la navigation dans un site web :

- ❖ Pré-requis : manipulation d'un ordinateur : clic, double-clic, ...
- ❖ Objectifs : savoir consulter un site web
- ❖ Outils : un ordinateur, une page web conçue en avance
- ❖ Méthodes : méthodes actives
- ❖ Travaux demandés :
  - Ouvrir une page web
  - Lire des rubriques
  - Cliquer sur les liens ou menus

Un des objectifs de l'instauration de cette nouvelle discipline est d'aider les nouveaux bacheliers qui désirent continuer leurs dans les universités car l'instauration de la méthode LMD est très en vogue.

Ensuite, il est indispensable de dispenser ce cours car beaucoup de lycéens vont dans les cybers et dépensent une heure de temps sans rien faire.

## CONCLUSION GENERALE

Pour conclure notre travail, nous pouvons dire que nous avons effectué toutes les études nécessaires sur les transformateurs pour élaborer notre logiciel didactique.

Ajoutons à cela que notre étude est surtout basée sur les transformateurs, mais il est très important de savoir des notions qui les concernent afin de faciliter la formulation des cours donnés dans ce didacticiel.

En effet, nous avons élaboré le logiciel didactique de transformateur qu'on a appelé « Transformer Didactic's » qui est conçu à partir du langage de programmation Delphi et le HTML. Ce logiciel, d'après son nom, peut simuler un transformateur

Avec ce logiciel, nous pouvons savoir les différents éléments du schéma équivalent lors des différents fonctionnements d'un transformateur depuis les données fournies par le constructeur et celles de la plaque signalétique.

En bref, si nous comparons les résultats du calcul manuel et ceux du logiciel, nous pouvons en déduire, vu leur similarité, que notre logiciel est opérationnel et est facile à utiliser. La vérification des paramètres d'entrées est aussi très facile car toutes ces valeurs sont enregistrées et peuvent être corrigées.

Ainsi, nous avons un logiciel didactique qui est un véritable outil pédagogique vu sa souplesse et sa facilité d'emploi et une aide pour son utilisation.

Durant ce travail, des difficultés ont été rencontrées surtout au niveau de la programmation mais on a pu les surmonter.

Pour améliorer ce logiciel didactique de simulation du transformateur,

Il reste à :

- Animer la page web en créant des liens ;
- Point de vue interface, améliorer la présentation ;

Pour terminer, je souhaite et j'encourage à celui ou celle qui va continuer à améliorer ou reconfigurer ce logiciel.

## **BIBLIOGRAPHIE**

[1] RAKOTONDRIATSARA Nomenjanahary Maminiaina  
Conception d'un didacticiel de simulation des courts-circuits dans un réseau électrique.

Mémoire, promotion NIOVA 2010

[2] SAID M'zé

Cours d'électrotechnique I professé à l'E.N.S.E.T Antsiranana.

Année 2008

[3] RAKOTO Jean de Dieu

Cours d'électrotechnique professé au Collège St François Xavier Fianarantsoa

Année 2004

[4] Programme officiel d'Electrotechnique, d'Essais et Mesures et de Technologie.

3è année, spécialité TMEL

Année scolaire 2009-2010

[5] JEAN Chatelain

Le Traité d'Electricité volume X, presses polytechniques Romandes,

Lausanne 1983.

[6] François BEAUCLAIR, Jean-Pierre DELVINQUIER et Jean-Pierre GROS

Transformateurs et inductances

Techniques de l'Ingénieur, traité Électronique

Année 1998

[7] Georges MANESSE

Transformateurs statiques, Principes et fonctionnement

Techniques de l'Ingénieur, traité Électronique

Année 1998

[8] G. Pinson

Conversions alternatif - alternatif. Transformateurs

Cours de Physique Appliquée

Année 2001

[9] Transformateur monophasé

Plate-forme 3E (Électricité, Electronique, Electrotechnique) C.E.S.I.R.E.

Université J.Fourier Grenoble

Année 2003

[10] Bernard MULTON

Modèles électriques du transformateur électromagnétique

Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure de Cachan

Année 1997

[11] Claude Chevassu

Couplage des transformateurs

Ecole Nationale de la Marine Marchande de Nantes

Année 1996

[12] BOUNCEUR AHCÈNE

Cours Delphi,

COPYRIGHT © 2001–2002 Borland Software Corporation

[13] DIDIER MAILLIET

Delphi et KyliX : des descendants de Pascal

Laboratoire d'Informatique Fondamentale de Lille

Année 1994

[14] Jérôme DARMONT

Programmation sous Delphi

Maîtrise d'Économétrie, Année 1999-2000

## **WEBOGRAPHIE**

<http://electrotechnique.forumactif.net/>

Electric Power Engineering Centre (EPECentre) University of

Canterbury, [joseph.lawrence@epecentre.ac.nz](mailto:joseph.lawrence@epecentre.ac.nz)

[www.lifl.fr/~jourdan](http://www.lifl.fr/~jourdan)

[www.abb.com/transformers](http://www.abb.com/transformers)

## LISTE DES FIGURES

|   |    |
|---|----|
| Figure 1.1 : Illustration des comportements magnétiques des substances                                    | 6  |
| Figure 1.2 : Constitution d'un circuit magnétique d'un transformateur                                     | 7  |
| Figure 1.3 : Circuits magnétiques pour transformateurs monophasés   | 7  |
| Figure 1.4 : Circuits magnétiques pour transformateurs triphasés  | 7  |
| Figure 1.5 : Différentes formes de noyaux   | 8  |
| Figure 1.6 : Noyau à section en forme de gradin d'un transformateur de puissance                          | 8  |
| Figure 1.7 : Raccordement du noyau sur la culasse par joint plan  | 9  |
| Figure 1.8 : Assemblage du noyau sur la culasse par joint enchevêtré                                      | 9  |
| Figure 1.9 : Coupe oblique du joint   | 9  |
| Figure 1.10 : Représentation des domaines magnétiques   | 10 |
| Figure 1.11 : Etape du phénomène d'aimantation d'un matériau ferromagnétique                              | 11 |
| Figure 1.12 : Courbe de première aimantation  | 11 |
| Figure 1.13 : Décomposition de la courbe de première aimantation  | 12 |
| Figure 1.14 : Courbes d'hystérésis et de première aimantation   | 12 |
| Figure 1.15 : Caractéristiques d'un matériau dur  | 14 |
| Figure 1.16 : Evaluation de $B = f(H)$ pour matériaux doux  | 15 |
| Figure 1.17 : Energie magnétisante d'un système non linéaire  | 16 |
| Figure 1.18 : Courbe d'hystérésis d'un matériau magnétique  | 17 |
| Figure 1.19 : Spire en court-circuit dans un matériau ferromagnétique                                     | 18 |
| Figure 1.20 : Réduction des pertes par courants de Foucault par fractionnement du circuit ferromagnétique | 18 |
| Figure 1.21 : Formes obtenues du circuit magnétique   | 20 |
| Figure 2.1 : Disposition de conducteurs dans un transformateur  | 24 |
| Figure 2.2 : Conducteurs en cuivre émaillé de diamètre rond   | 25 |
| Figure 2.3 : Conducteurs en aluminium de forme méplat   | 25 |
| Figure 2.4 : Vue en coupe d'un bobinage d'un transformateur   | 25 |
| Figure 2.5 : Schéma de principe d'un bobinage concentrique  | 26 |
| Figure 2.6 : Montage d'un enroulement BT d'un transformateur bobiné concentriquement                      | 27 |
| Figure 2.7 : Schéma de principe d'un bobinage en galette  | 27 |
| Figure 2.8 : Préparation d'un enroulement disposé en galette  | 27 |
| Figure 3.1 : Transformateur classique   | 32 |

|   |    |
|---|----|
| Figure 3.2 : Transformateur cuirassé  | 32 |
| Figure 3.3 : Représentation schématique d'un transformateur   | 33 |
| Figure 3.4 : Symboles d'un transformateur monophasé   | 33 |
| Figure 3.5 : Convention de signe et sens de tensions  | 34 |
| Figure 3.6 : Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur                                       | 34 |
| Figure 3.7 : Schéma d'un transformateur parfait   | 35 |
| Figure 3.8 : Symbole d'un transformateur idéal  | 38 |
| Figure 3.9 : Schéma d'un transformateur fonctionnant à vide   | 38 |
| Figure 3.10 : Schéma d'un transformateur fonctionnant en charge   | 39 |
| Figure 3.11 : Diagramme de force magnétomotrice d'un transformateur   | 40 |
| Figure 3.12 : Schéma équivalent d'un transformateur réel  | 43 |
| Figure 3.13 : Schéma équivalent d'un transformateur réel avec introduction de l'effet du circuit magnétique | 43 |
| Figure 3.14 : Schéma équivalent du transformateur ramené au primaire  | 44 |
| Figure 3.15 : Schéma équivalent du transformateur ramené au primaire avec considération des pertes fer      | 45 |
| Figure 3.16 : Schéma équivalent d'un transformateur en régime permanent                                     | 48 |
| Figure 3.17 : Schéma équivalent transformé d'un transformateur en régime permanent                          | 49 |
| Figure 3.18 : Schéma équivalent d'un transformateur fonctionnant à vide                                     | 50 |
| Figure 3.19 : Diagramme vectoriel d'un transformateur fonctionnant à vide                                   | 51 |
| Figure 3.20 : Schéma de principe d'un transformateur en court-circuit                                       | 52 |
| Figure 3.21 : Schéma équivalent d'un transformateur en court-circuit  | 52 |
| Figure 3.22 : Schéma équivalent réduit d'un transformateur en court-circuit                                 | 53 |
| Figure 3.23 : Schéma équivalent d'un transformateur en court-circuit figurant son impédance                 | 53 |
| Figure 3.24 : Diagramme de Kapp d'un transformateur en court-circuit  | 54 |
| Figure 3.25 : Schéma équivalent d'un transformateur en charge   | 56 |
| Figure 3.26 : Diagrammes de Kapp d'un transformateur en charge  | 56 |
| Figure 3.27 : Diagramme de cercle   | 57 |
| Figure 3.28 : Variation de la chute de tension en fonction de l'angle de déphasage $\varphi_{ch}$           | 57 |
| Figure 3.29 : Détermination graphique de la chute de tension  | 58 |
| Figure 3.30 : Courbes des pertes  | 62 |
| Figure 3.31 : Schéma équivalent d'un transformateur à vide pour le calcul des pertes                        |    |

|  |    |
|--|----|
| magnétiques  | 63 |
| Figure 3.32 : Bilan de puissance d'un transformateur                               | 63 |
| Figure 3.33 : Courbes des rendements   | 65 |
| Figure 3.34 : Schéma de montage d'un essai en charge en utilisant deux wattmètres  | 66 |
| Figure 3.35 : Schéma de montage d'un essai à vide                                  | 67 |
| Figure 3.36 : Schéma de montage d'un essai en court-circuit                        | 68 |
| Figure 3.37 : Schéma de montage d'un essai en charge en mesurant $P_1$ seulement   | 69 |
| Figure 4.1 : Disposition idéale des noyaux   | 70 |
| Figure 4.2 : Disposition réelle des noyaux   | 71 |
| Figure 4.3 : Constitution d'un transformateur triphasé                             | 71 |
| Figure 4.4 : Représentation d'un transformateur triphasé                           | 71 |
| Figure 4.5 : Symboles d'un transformateur triphasé                                 | 72 |
| Figure 4.6 : Distribution de flux dans transformateur triphasé                     | 72 |
| Figure 4.7 : Représentation conventionnelle d'un transformateur triphasé           | 75 |
| Figure 4.8 : Couplage en étoile  | 76 |
| Figure 4.9 : Couplage en triangle  | 77 |
| Figure 4.10 : Couplage en zig-zag  | 78 |
| Figure 4.11 : Définition de l'indice horaire                                       | 79 |
| Figure 4.12 : Schéma de couplage et diagramme de tensions d'un transformateur Yd5  | 79 |
| Figure 4.13 : Schéma de couplage et diagramme de tensions d'un transformateur Yz11 | 80 |
| Figure 4.14 : Description d'une plaque signalétique d'un transformateur            | 80 |
| Figure 4.15 : Mise en parallèle de deux transformateurs triphasés                  | 81 |
| Figure 5.1 : Structure d'un script HTML  | 86 |
| Figure 5.2 : Un script HTML complet  | 86 |
| Figure 1.3 : Un exemple de script HTML   | 87 |
| Figure 5.4 : Un exemple de page web  | 87 |
| Figure 5.5 : Espace de travail de Html Help  | 88 |
| Figure 5.6 : Création d'un projet  | 88 |
| Figure 5.7 : Création d'un projet  | 89 |
| Figure 5.8 : Création de la destination du projet                                  | 89 |
| Figure 5.9 : Ajout des fichiers HTML   | 90 |
| Figure 5.10 : Fenêtre principale avec pour affichage                               | 91 |
| Figure 5.11 : Création du fichier sommaire (HHC)                                   | 91 |

|   |     |
|---|-----|
| Figure 5.12 : Création du fichier sommaire (HHC)  | 92  |
| Figure 5.13 : Création du fichier Index   | 93  |
| Figure 5.14 : Organigramme général de calcul  | 94  |
| Figure 5.15 : Page d'accueil de Transformer Didactic's  | 95  |
| Figure 5.16 : Page d'accueil du didacticiel   | 95  |
| Figure 5.17 : Contenu d'un livret   | 96  |
| Figure 5.18 : Onglet « Paramétrage »  | 97  |
| Figure 5.19 : Onglet « Élément du schéma équivalent »   | 98  |
| Figure 5.20 : Onglet « Bilan énergétique »  | 99  |
| Figure 6.1: Schéma équivalent lors de l'essai à vide  | 101 |
| Figure 6.2 : Résultat donné par « Tranformer Didactic's » lors de l'essai à vide                    | 102 |
| Figure 6.3 : Schéma équivalent lors de l'essai en court-circuit                                     | 102 |
| Figure 6.4 : Résultat donné par « Tranformer Didactic's » lors de l'essai en court-circuit          | 103 |
| Figure 6.5 : Schéma équivalent lors de l'essai en charge en utilisant l'approximation de Kapp       | 104 |
| Figure 6.6 : Résultat donné par « Tranformer Didactic's » lors de l'essai en charge                 | 106 |
| Figure 6.7 : Résultat donné par « Tranformer Didactic's » pour le bilan de puissance                | 107 |
| Figure 7.1 : Constitution d'un transformateur   | 110 |
| Figure 7.2 : Constitution du circuit magnétique   | 111 |
| Figure 7.3 : Différentes formes de colonnes   | 113 |
| Figure 7.4 : Différentes sortes de joints pour le raccord de colonne et culasse d'un transformateur | 113 |
| Figure 7.5 : Différentes formes du circuit magnétique   | 114 |
| Figure 7.6 : Disposition du circuit magnétique d'un transformateur monophasé                        | 114 |
| Figure 7.7 : Disposition du circuit magnétique d'un transformateur triphasé                         | 115 |
| Figure 7.8 : Disposition des enroulements d'un transformateur                                       | 116 |
| Figure 7.9 : Schéma de couplage et diagramme de tensions d'un transformateur Yy0                    | 117 |
| Figure 7.10 : Schéma de couplage et diagramme de tensions d'un transformateur Dy11                  | 117 |
| Figure 7.11 : Schéma de principe du relais Bucholz  | 118 |

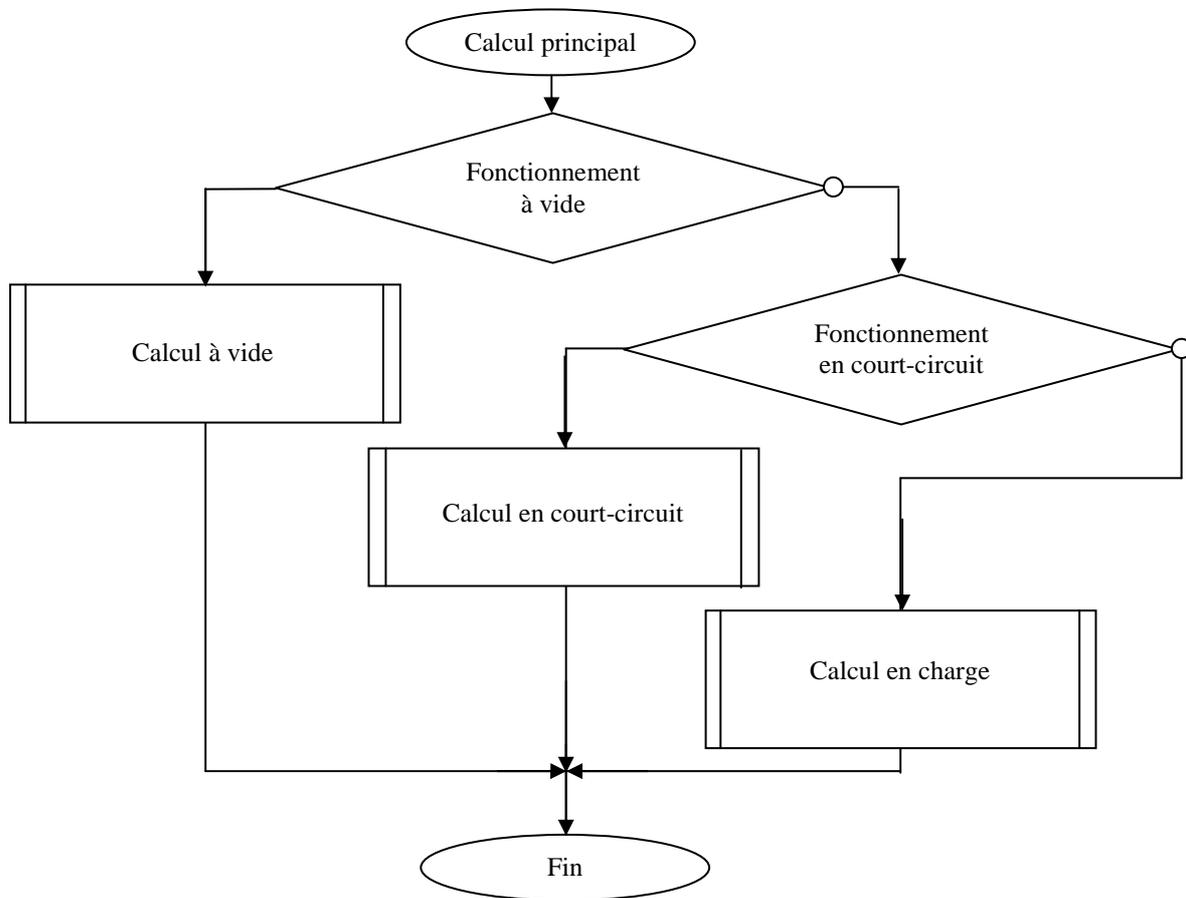
## **LISTE DES TABLEAUX**

|   |     |
|---|-----|
| Tableau 2.1 : Caractéristiques des principaux matériaux conducteurs utilisés dans un bobinage           | 24  |
| Tableau 2.2 : Classification des isolants en fonction des températures maximales admissibles en continu | 28  |
| Tableau 2.3 : Classement par ordre décroissant des différents types de vernis                           | 29  |
| Tableau 7.1 : Programme suggéré   | 109 |
| Tableau 7.2 : Principaux modes de refroidissement d'un transformateur                                   | 119 |
| Tableau 7.3 : Principaux paramètres de la plaque signalétique   | 120 |

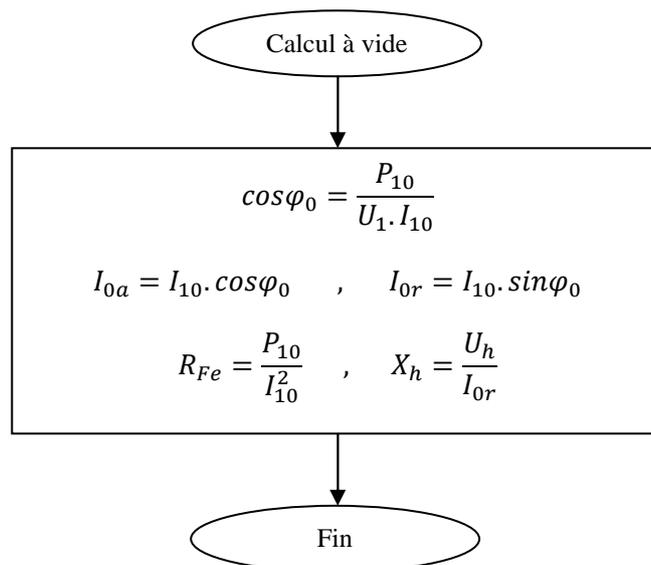
# **ANNEXES**

**Annexe 1**

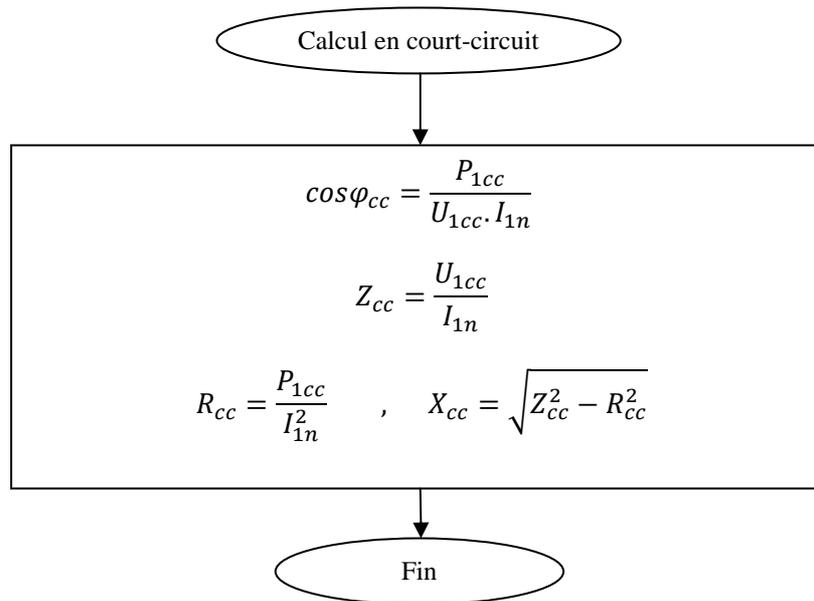
**Organigramme du calcul principal**



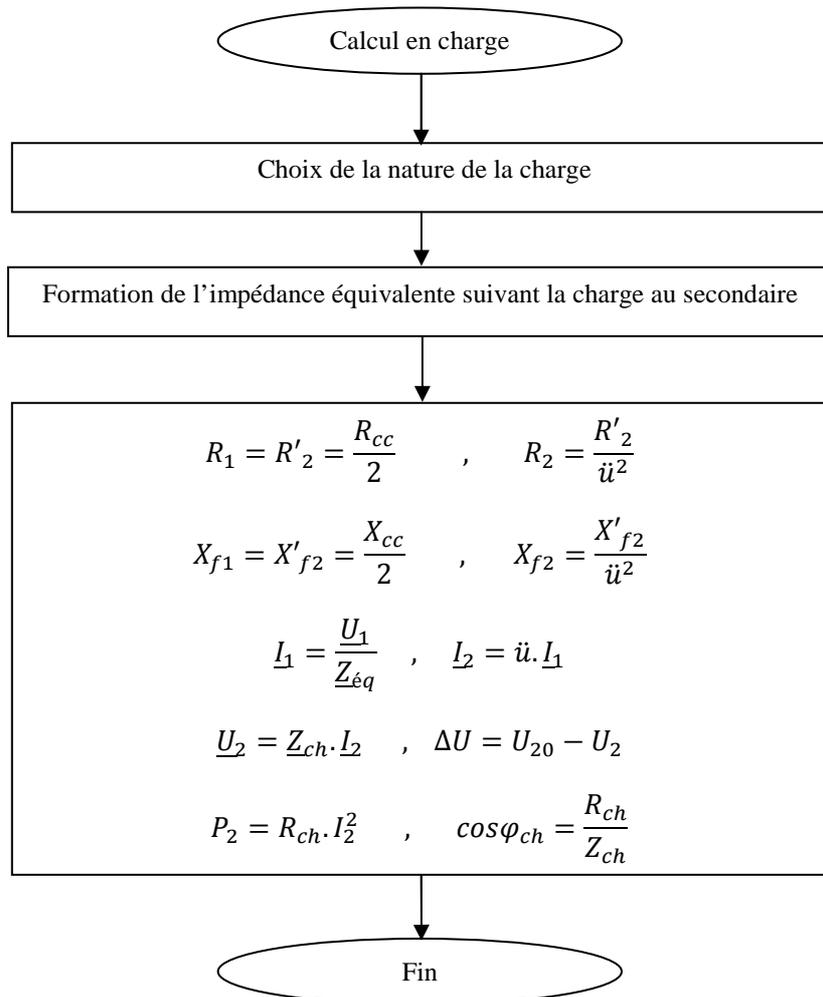
Organigramme pour le calcul des éléments du schéma équivalent à vide :



Organigramme pour le calcul des éléments du schéma équivalent en court-circuit :



Organigramme pour le calcul des éléments du schéma équivalent en charge :



## Annexe 2

### Programme officiel de l'Enseignement Technique

Formation : Professionnelle et Initiale

Spécialité : TMEL

Niveau : 3<sup>ème</sup> Année

Discipline : Technologie

#### SMF 10 : LES MACHINES ELECTRIQUES A COURANT ALTERNATIF

Objectif général : A l'issue de ce sous-module de formation, l'apprenant doit être capable de MAITRISER les connaissances technologiques sur les machines électriques à courant alternatif.

| Indexation     | Unités de formation  | Durée |
|----------------|--|-------|
| MDF2/SMF10/UF1 | <b>TRANSFORMATEURS MONOPHASE ET TRIPHASE</b><br>- Organisation générale<br>- Etude de la partie magnétique<br>- Etude de la partie mécanique<br>- Mode de refroidissement<br>- Diagramme vectoriel et couplages usuels des enroulements et indice horaire<br>- Protection d'un transformateur<br>- Les autotransformateurs | 12 H  |
| MDF2/SMF10/UF2 | <b>MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASE</b><br>- Principe<br>- Mode de démarrage  | 04 H  |
| MDF2/SMF10/UF3 | <b>MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE</b><br>- Partie électrique<br>- Partie magnétique<br>- Partie mécanique<br>- Environnement : classe, indice de protection<br>- Les problèmes d'échauffement<br>- Réglage de vitesse<br>- Les moteurs pas à pas   | 12 H  |

|                |   |      |
|----------------|---|------|
| MDF2/SMF10/UF4 | GENERATRICE ASYNCHRONE<br>- Description<br>- Principe<br>- Différents modes d'excitation<br>- Couplage en parallèle | 08 H |
|                | TOTAL   | 36 H |

**Source:**

Lycée Technique et Professionnel Beravina Fianarantsoa  
Collège Saint François Xavier Ambatomena Fianarantsoa  
Année Scolaire 2009-2010

## Annexe 3

|  <b>Fiche Technique du transformateur 1600 kVA 30 kV / 0,4 kV</b><br><b>Respirant</b>  |   |
|--|---|
| ELECTRO-INDUSTRIES   |   |
| Certifié<br>ISO 9001/2000  |   |
| Caractéristiques Fournisseur   |   |
| Pays   | ALGERIE   |
| Fabricant  | ELECTRO-INDUSTRIES                                  |
| Usine de fabrication   | AZAZGA  |
| Référence du fabricant   | Tél : 026/34.16.86 –<br>Fax 026/34.14.24 / 34.13.30 |
| Normes de références   | CEI 76 - DIN 42511                                  |
| Lieu d'installation  | Extérieur/intérieur                                 |
| Type de transformateur   | Respirant   |
| Mode de refroidissement  | ONAN  |
| Nature du diélectrique   | Huile minérale                                      |
| Type d'enroulement MT  | Fil cuivre  |
| Type d'enroulement BT  | Fil méplat de cuivre                                |
| Fréquence  | 50 Hz   |
| Prise de réglage   | ± 2x2,5 %   |
| Tension secondaire à vide  | 400 V   |
| Tension la plus élevée pour le matériel  | 36 KV   |
| Tension d'isolement BT masse   | 10 KV   |
| Tension d'isolement à fréquence industrielle   | 70 KV   |
| Tension d'isolement à l'onde de choc MT  | 170 KV  |
| Tension d'isolement à l'onde de choc BT  | 30 KV   |
| Courant à vide   | 1,4 %   |
| Pertes à vide  | 2600 W  |
| Tension de court-circuit à 75°C  | 6 %   |
| Pertes en court circuit à 75°C   | 19800 W   |
| Couplage   | Dyn 11  |
| Température ambiante   | 40 °C   |
| Altitude (m)   | ≤ 1000  |
| Echauffement moyen des enroulements  | 65 °C   |
| Echauffement maximum de l'huile  | 60 °C   |
| Type de bornes MT  | Porcelaine  |
| Type de bornes BT  | Porcelaine  |
| Distances entre les traversées MT  | 320 mm  |
| Encombres et masses maximum  |   |
| Longueur   | 2315 mm   |
| Largeur  | 1280 mm   |
| Hauteur  | 2400 mm   |
| Masse d'huile  | 1111 Kg   |
| Masse totale   | 4295 Kg   |
| Dispositions des bornes BT   | Neutre à gauche vu côté<br>BT                       |
| Repérage des bornes  | Par Symboles gravés sur le<br>couvercle             |

  
 EPE ELECTRO-INDUSTRIES  
 UNITÉ TRANSFORMATEURS  
 SERVICE ETUDES  
 ET DEVELOPPEMENTS

## Listing de programme

```

unit Unit1;
M/
interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes,
  Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, ComCtrls, Menus, math,
  jpeg, ExtCtrls, Buttons, XPMAN, VarCmplx;

private
  { Private declarations }
public
  { Public declarations }
u20,u1, Pfe, Rcc, Xcc,R, L,C,I1,I2,m,P2,Q2,S2,
cosphi,sinphi,phi,deltau,U2,w,L1,C1,Pj,P1 : real;
Zeq,Z,Z1,I1n,test,Zprim: variant;
ti10,Rfe,i10,Ia,Ir,P10,Q10,S10,cosphi0
phi0,I2prim,AnIm:real;
Vcc,ucc,I2cc,P1cc,Q1cc,S1cc,cosphicc,rend,R1
,R2,Xf1,Xf2,xh,R2prim,Xf2prim :real;
a,but,aff:integer;
J1n,I2n,Sn: real;
end;
var
  Form1: TForm1;
implementation
uses unit4;
{$R *.dfm}

const
  HH_HELP_CONTEXT      = $000F;
  HH_DISPLAY_TOPIC    = $0000;

function HtmlHelp(hwndCaller: HWND;
  pszFile: PChar; uCommand: UINT;
  dwData: DWORD): HWND; stdcall;
external 'HHCTRL.OCX' name 'HtmlHelpA';

-----calcul à vide -----
procedure TForm1.calcul1;
begin
  groupbox4.Visible := true;
  groupbox5.Visible := false;
  groupbox6.Visible := false;
  groupbox8.Visible := false;
  tI10:=strtofloat(caractest(Edit4.Text));
  I10:=(ti10*J1n)/100;
  Rfe:=strtofloat(edit3.Text)/sqr(I10);
  P10:= strtofloat(edit3.Text);
  cosphi0:=P10/(U1*I10);
  edit19.Text:=floattostr(roundto(cosphi0,-3));
  //Xh:=sqr(u1)/sqrt(abs(sqr(u1*I10)-sqr(P10)));

  Q10:=sqr(U1)/Xh;
  S10:=sqrt(sqr(P10)+sqr(Q10));

```

```

end
else if cosphi0 < -1 then
begin
  phi0:=-1;
end
else
begin
  phi0:=arccos(cosphi0);
end;
Ia:=cos(phi0)*I10;
Ir:=sin(phi0)*I10;
edit34.Text:='0';
edit36.Text:='0';
if aff=1 then
begin
  edit7.Text:=floattostr(roundto(I10,-3));
  edit5.Text:=floattostr(roundto(Rfe,-3));
  edit8.Text:=floattostr(roundto(P10,-3));
  edit6.Text:=floattostr(roundto(Xh,-3));
  edit9.Text:=floattostr(roundto(Q10,-3));
  edit14.Text:=floattostr(roundto(S10,-3));
  edit12.Text:=floattostr(roundto(Ia,-3));
  edit13.Text:=floattostr(roundto(Ir,-3));
  edit35.Text:=floattostr(roundto(Pfe,-3));
end
else
begin
  edit7.Text:=floattostr(roundto(I10/J1n,-3));
  edit5.Text:=floattostr(roundto(Rfe,-3));
  edit8.Text:=floattostr(roundto(P10/Sn,-3));
  edit6.Text:=floattostr(roundto(Xh,-3));
  edit9.Text:=floattostr(roundto(Q10/Sn,-3));
  edit14.Text:=floattostr(roundto(S10/Sn,-3));
  edit12.Text:=floattostr(roundto(Ia/J1n,-3));
  edit13.Text:=floattostr(roundto(Ir/J1n,-3));
  edit35.Text:=floattostr(roundto(Pfe/Sn,-3));
end;
end;
-----calcul en court-circuit -----
procedure TForm1.calcul2;
begin
  groupbox4.Visible := false;
  groupbox5.Visible := true;
  groupbox6.Visible := false;
  groupbox8.Visible := false;
  Vcc:=strtofloat(edit40.Text);
  ucc:=(Vcc*u1)/100;
  I2cc:=ucc/VarComplexAbs(Z1);
  P1cc:=Rcc*sqr(I2cc);
  Q1cc:=sqr(ucc)/Xcc;
  S1cc:=sqrt(sqr(Q1cc)+sqr(P1cc));
  cosphicc:=Rcc/VarComplexAbs(Z1);
  edit18.Text:=floattostr(roundto(cosphicc,-3));
  edit34.Text:='0';
  edit35.Text:='0';
  if aff=1 then

```

```

if cosphi0 > 1 then
begin
  phi0:=1;
begin
  edit15.Text:=floattostr(roundto(I2cc,-3));
  edit17.Text:=floattostr(roundto(P1cc,-3));
  edit20.Text:=floattostr(roundto(Q1cc,-3));
  edit21.Text:=floattostr(roundto(S1cc,-3));
  edit36.Text:=floattostr(roundto(P1cc,-3));
end
else
begin
  edit15.Text:=floattostr(roundto(I2cc/I2n,-3));
  edit17.Text:=floattostr(roundto(P1cc/Sn,-3));
  edit20.Text:=floattostr(roundto(Q1cc/Sn,-3));
  edit21.Text:=floattostr(roundto(S1cc/Sn,-3));
  edit36.Text:=floattostr(roundto(P1cc/Sn,-3));
end;
end;
-----calcul en charge -----
procedure Tform1.calcul3;
var Za,Zb,Zc,Zb1,Ux,Uh,I0,I2primC : variant;
a,b:real;
begin
w:=100*pi;
if combobox3.ItemIndex = 0 then
begin
  calcul31
end
else if combobox3.ItemIndex = 1 then
begin
  calcul32
end
else if combobox3.ItemIndex = 2 then
begin
  calcul33
end
else if combobox3.ItemIndex = 3 then
begin
  calcul34
end
else if combobox3.ItemIndex = 4 then
begin
  calcul35
end;
m:=u1/u20;
Zprim:=Z*sqr(m);
R2prim:=sqr(m)*R2;
Xf2prim:=sqr(m)*Xf2;
if combobox5.ItemIndex=0 then
begin
  Z1:=varcomplexcreate(Rcc,Xcc);
  Zeq:=Zprim+Z1;
  panel2.Visible:=true;
  panel3.Visible:=false;
end
else
begin
  Za:=varcomplexcreate(R1,Xf1);
  Zb1:=varcomplexcreate(0,Xh);
  Zc:=
varcomplexcreate(R2prim+Zprim,Xf2prim+Xh);
  Zeq:=Za+((Zb*Zb1)/Zc);
  panel2.Visible:=false;
  panel3.Visible:=true;
end;
I1n:=u1/Zeq;
I1:=VarComplexAbs(I1n);
edit11.Text:=floattostr(roundto(I1,-3));
if combobox5.ItemIndex=0 then
begin
  I2prim:=I1;
end
else
begin
  Ux:=I1n*varcomplexcreate(R1,Xf1);
  Uh:=U1-Ux;
  I0:=Uh/varcomplexcreate(0,Xh);
  I2primC:=I0-I1n;
  I2prim:=VarComplexAbs(I2primC);
end;
I2:=I2prim*m;
P2:=Re(Z)*sqr(I2);
Q2:=Im(Z)*sqr(I2);
S2:=sqrt(sqr(P2)+sqr(Q2));
U2:=Re(Z)*I2;
phi:=VarComplexAngle(Z);
edit10.Text:=floattostr(roundto(phi*180/pi,-3));
cosphi:=cos(phi);
edit25.Text:=floattostr(roundto(cosphi,-3));
sinphi:=sin(VarComplexAngle(Z));
deltau:=U20-U2;
//if phi<0 then deltau:=-deltau;
edit35.Text:=edit3.Text;
Pj:=Rcc*sqr(I1);
edit34.Text:=edit30.Text;
a:=roundto(Im(Z),-2);
b:=roundto(re(Z),-2);
labelZch.Caption:=varcomplexcreate(b,a);
if aff=1 then
begin
  edit23.Text:=floattostr(roundto(I2,-3));
  edit30.Text:=floattostr(roundto(P2,-3));
  edit31.Text:=floattostr(roundto(Q2,-3));
  edit32.Text:=floattostr(roundto(S2,-3));
  edit24.Text:=floattostr(roundto(U2,-3));
  edit26.Text:=floattostr(roundto(deltau,-3));
  edit36.Text:=floattostr(roundto(Pj,-3));
end
else
begin
  edit23.Text:=floattostr(roundto(I2/I2n,-3));
  edit30.Text:=floattostr(roundto(P2/Sn,-3));
  edit31.Text:=floattostr(roundto(Q2/Sn,-3));
  edit32.Text:=floattostr(roundto(S2/Sn,-3));

```

```

Zb:= varcomplexcreate(R2prim+Zprim,Xf2prim);

edit24.Text:=floattostr(roundto(U2/U20,-3));
edit26.Text:=floattostr(roundto(deltau/U20,-3));
edit36.Text:=floattostr(roundto(Pj/Sn,-3));

end;
end;

.....procedure en charge.....
_____resistive_____
procedure Tform1.calcul31;
begin
  groupbox4.Visible := false;
  groupbox5.Visible := false;
  groupbox6.Visible := true;
  panel21.Visible:=false;
  panel22.Visible:=false;
  panel20.Visible:=true;
  Z:=varcomplexcreate(R,0);
end;

_____R-L série_____
procedure Tform1.calcul32;
begin
  groupbox4.Visible := false;
  groupbox5.Visible := false;
  groupbox6.Visible := true;
  groupbox8.Visible := true;
  panel21.Visible:=false;
  panel22.Visible:=true;
  panel20.Visible:=false;
  imageRLS.Visible:=true;
  imageRCS.Visible:=false;
  Z:=varcomplexcreate(R,L*w);
end;

//_____R-L parallèle_____
procedure Tform1.calcul33;
begin
  groupbox4.Visible := false;
  groupbox5.Visible := false;
  groupbox6.Visible := true;
  groupbox8.Visible := true;
  panel21.Visible:=true;
  panel22.Visible:=false;
  panel20.Visible:=false;
  imageRLP.Visible:=true;
  imageRCP.Visible:=false;
  if varcomplexcreate(R,L*w)<>0
then Z:=varcomplexcreate(0,R*L*w)/varcomplexcreate(R,L
end;

//_____R-C série_____
procedure Tform1.calcul34;
begin
  if (C*w) <> 0 then Z:=varcomplexcreate(R,-1/(C*w));
  panel21.Visible:=false;
  panel22.Visible:=true;
  panel20.Visible:=false;
  imageRLS.Visible:=false;
  imageRCS.Visible:=true;
end;

//_____R-C
parallèle_____

procedure Tform1.calcul35;
begin
  if varcomplexcreate(1,R*C*w)<> 0 then
Z:=varcomplexcreate(R,0)/varcomplexcreate(1,R*
C*w);
  panel21.Visible:=true;
  panel22.Visible:=false;
  panel20.Visible:=false;
  imageRLP.Visible:=false;
  imageRCP.Visible:=true;
end;

function Tform1.Re(Z:variant):real;
begin
  Re:=(Z+VarComplexConjugate(Z))/2;
end;
function Tform1.Im(Z:variant):real;
begin
  Im:=((Z-
VarComplexConjugate(Z))*varcomplexcreate(0,-
1))/2;
end;
function Tform1.caractest(a:string):string;
var i,n:integer;
    k:char;
begin
  n:=length(a);
  for i:=0 to n do
  begin
    k:=a[i];
    if k='.' then a[i]:=',';
  end;
  caractest:=a;
end;
end;

```

## TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS

NOTATIONS ET SYMBOLES

INTRODUCTION

|   |    |
|---|----|
| Première partie : ETUDE THEORIQUE DU TRANSFORMATEUR.....  | 1  |
| 1. Historique .....   | 2  |
| 2. Généralités .....  | 4  |
| Chapitre 1 : LES CIRCUITS MAGNETIQUES DES TRANSFORMATEURS .....                                   | 5  |
| 1.1 Introduction .....  | 5  |
| 1.2 Classification des substances.....  | 5  |
| 1.3 Nécessité du noyau magnétique .....   | 6  |
| 1.4 Rôle et constitution.....   | 6  |
| 1.5 Le noyau .....  | 8  |
| 1.6 Les joints.....   | 8  |
| 1.7 Le phénomène d'aimantation d'un matériau ferromagnétique.....                                 | 9  |
| 1.8 Le processus d'aimantation .....  | 10 |
| 1.9 La courbe d'aimantation d'un matériau ferromagnétique .....                                   | 12 |
| 1.10 La classification des matériaux magnétiques .....  | 13 |
| 1.10.1 Les matériaux durs .....   | 13 |
| 1.10.2 Les matériaux doux.....  | 14 |
| 1.11 Propriétés des matériaux magnétiques pour transformateurs .....                              | 16 |
| 1.12 Pertes dans les matériaux magnétiques .....  | 16 |
| 1.12.1 Energie magnétisante : .....   | 16 |
| 1.12.2 Les pertes par hystérésis .....  | 17 |
| 1.12.3 Les pertes dites par courants de Foucault .....  | 17 |
| 1.12.4 Les pertes supplémentaires .....   | 18 |
| 2 Familles de matériaux magnétiques pour transformateurs .....                                    | 19 |
| 1.13.1 Les alliages de Fer-Silicium.....  | 20 |
| 1.13.2 Les alliages Fer-Nickel .....  | 21 |
| 1.13.3 Les alliages Fer-Cobalt .....  | 21 |
| Chapitre 2 : LES ENROULEMENTS DES TRANSFORMATEURS .....   | 23 |
| 2.1 Généralités .....   | 23 |
| 2.2 Structure des matériaux conducteurs pour la réalisation de bobinage des transformateurs ..... | 23 |

|   |  |    |
|---|--|----|
| 2.2.1                                       | Le cuivre .....  | 23 |
| 2.2.2                                       | L'aluminium .....  | 23 |
| 2.3   | Structure de bobinage d'un transformateur .....                        | 25 |
| 2.3.1                                       | Bobinage dit concentrique .....  | 26 |
| 2.3.2                                       | Bobinage dit en galette.....   | 27 |
| 2.4   | Isolement des conducteurs.....   | 28 |
| 2.5   | Choix d'un fil émaillé.....  | 29 |
| 2.6   | Choix des matériaux isolants.....                                      | 30 |
| 2.7   | Pertes et échauffement dans les enroulements des transformateurs ..... | 30 |
| Chapitre 3 : TRANSFORMATEUR MONOPHASE ..... |  | 32 |
| 3.1   | Constitution .....   | 32 |
| 3.2   | Principe de fonctionnement .....                                       | 33 |
| 3.3   | Transformateur parfait .....   | 35 |
| 3.3.1                                       | Rapport de transformation .....  | 36 |
| 3.4   | Transformateur réel .....  | 38 |
| 3.4.1                                       | Equations des forces magnétomotrices .....                             | 38 |
| 3.4.2                                       | Composantes des flux .....   | 41 |
| 3.4.3                                       | Equations des inductances .....  | 41 |
| 3.4.4                                       | Schéma équivalent .....  | 42 |
| 3.4.5                                       | Introduction des pertes fer .....                                      | 45 |
| 3.4.6                                       | Inductances propres et mutuelles .....                                 | 45 |
| 3.4.7                                       | Equations caractéristiques.....  | 47 |
| 3.4.8                                       | Schéma équivalent transformé.....                                      | 49 |
| 3.5   | Marche à vide .....  | 50 |
| 3.5.1                                       | Diagramme vectoriel.....   | 51 |
| 3.6   | Fonctionnement en court-circuit.....                                   | 52 |
| 3.6.1                                       | Diagramme vectoriel.....   | 54 |
| 3.7   | Fonctionnement en charge.....  | 55 |
| 3.8   | Calcul approché de la variation de la tension .....                    | 58 |
| 3.9   | Pertes et rendement dans un transformateur.....                        | 61 |
| 3.10  | Calcul du rendement.....   | 66 |
| 3.10.1                                      | Mesure directe.....  | 66 |
| 3.10.2                                      | La mesure des pertes séparées .....                                    | 66 |

|  |     |
|--|-----|
| Chapitre 4 : TRANSFORMATEURS TRIPHASES.....                                | 70  |
| 4.1 Présentation .....   | 70  |
| 4.2 Constitution .....   | 70  |
| 4.3 Equations des tensions.....  | 72  |
| 4.4 Couplage d'un transformateur triphasé.....                             | 75  |
| 4.4.1 Mode de couplage .....   | 75  |
| 4.4.2 Mode de connexion des enroulements de transformateurs triphasés..... | 76  |
| 4.5 Indice horaire.....  | 79  |
| 4.5.1 Exemples d'applications .....  | 79  |
| 4.6 Mise en parallèle des transformateurs .....                            | 81  |
| 4.6.1 But .....  | 81  |
| 4.6.2 Conditions de couplage en parallèle .....                            | 82  |
| Deuxième partie : REALISATION ET PRESENTATION DU DIDACTICIEL.....          | 83  |
| Chapitre 5 : REALISATION ET CONCEPTION DU PROGRAMME.....                   | 85  |
| 5.1 Choix du langage de programmation.....                                 | 85  |
| 5.2 Réalisation du programme.....  | 85  |
| 5.2.1 Le HTML .....  | 85  |
| 5.3 Présentation du logiciel .....   | 94  |
| 5.3.1 Manuel d'utilisation .....   | 95  |
| 5.3.2 Particularité de Transformer Didactic's.....                         | 99  |
| Chapitre 6 : ESSAI ET VALIDATION .....                                     | 100 |
| 6.1 Généralité.....  | 100 |
| 6.2 Essai.....   | 100 |
| 6.3 Interpretations.....   | 107 |
| Chapitre 7 : IMPLICATION PEDAGOGIQUE .....                                 | 108 |
| 7.1 Introduction .....   | 108 |
| 7.2 Les transformateurs .....  | 109 |
| 7.2.1 Généralité.....  | 109 |
| 7.2.2 Circuit magnétique.....  | 110 |
| 7.2.3 Organes électriques .....  | 114 |
| 7.2.4 Organes mécaniques .....   | 117 |
| 7.2.5 Exercices d'application.....   | 119 |
| 7.2.6 Suggestion sur l'enseignement du langage HTML à l'ENSET.....         | 120 |

|   |     |
|---|-----|
| 7.2.7 Familiarisation des élèves du lycée à consulter un site web ..... | 121 |
| CONCLUSION GENERALE .....   | 122 |
| BIBLIOGRAPHIE .....   | 123 |
| LISTE DES FIGURES .....   | 126 |
| LISTE DES TABLEAUX.....   | 130 |
| ANNEXES .....   | 131 |