



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté Sciences de l'ingénieur

Année 2008

Département Electrotechnique

## MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de **MAGISTER**

# ETUDE ET MODELISATION DES DEFAUTS DES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE

Option

Réseaux électriques

Par

**Mr. REKIK BADRI**

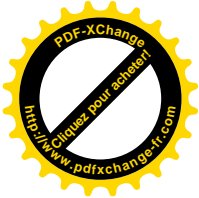
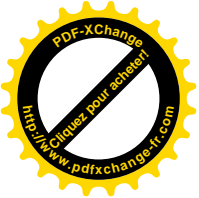
DIRECTEUR DE MEMOIRE : **Mr. H. LABAR** MC UNIVERSITE ANNABA

DEVANT LE JURY

President : **Mr. BOUNAYA K.** MC UNIVERSITE GUELMA

Examineurs : **Mr. OUARI A** MC UNIVERSITE ANNABA  
**Mr. OMERI A** MC UNIVERSITE ANNABA  
**Mr. ADJABI M** MC UNIVERSITE ANNABA

Membre invité : **Mr. MOUHEB M** ING CHEF SERVICE EXPLOITATION  
ELECTRICITE SONELGAZ  
ANNABA



# REMERCIEMENTS

*Le plus grand Merci revient à dieu qui lui seul nous a guidé dans le bon sens durant notre vie et qui nous aidé à réaliser ce modeste travail.*

*Je remercie vivement mon encadreur **Mr. LABAR H.** qui a été présent et très actif tout au long de ce travail, n'hésitant pas à prendre sur son temps pour nous aider du début jusqu'à la rédaction du mémoire.*

*Je souhaite aussi exprimer mes plus sincères remerciements à chacun des membres du jury qui, malgré leurs responsabilités, ont bien voulu me consacrer du temps :*

***Mr. BOUNAYA K,** Maître de Conférences à l'université de GUELMA*

***Mr. OUARI A,** Maître de Conférences à l'université de ANNABA*

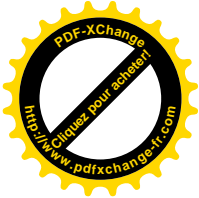
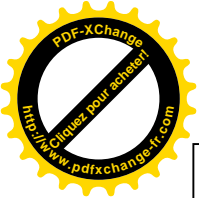
***Mr. OMERI A,** Maître de Conférences à l'université de ANNABA*

***Mr ADJABI M,** Maître de Conférences à l'université de ANNABA*

*Je tiens aussi à remercier en particulier Monsieur **MOUHEB M,** chef service exploitation électricité SONELGAZ ANNABA 1 pour toute son aide, sa lucidité impressionnante et sa sagesse discrète.*

*Un grand Merci A tous les enseignants de la faculté sciences de l'ingénieur.*

Mr.Rekik Badri



# Dédicace

Je dédié ce modeste travail  
aux être qui me sont  
les plus chers.

A mes chers parents qui  
m'ont toujours  
encouragé symbole de  
tendresse pour leur

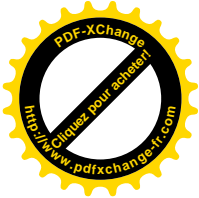
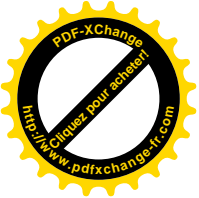
sacrifice estimable "que  
dieu vous garde"

A mes deux chères sœurs.

A mon encadreur Mr " LABAR  
HOCINE " .

A mes collègues de  
travaille au sien de La  
SONELGAZ ANNABA 1.

A tous les professeurs qui  
m'ont enseigne.



## Résumé :

Le développement et la croissance de la population et l'industrie entraîne une amélioration des exigences de consommation de l'énergie électrique non seulement de point de vue quantitative mais aussi qualitative.

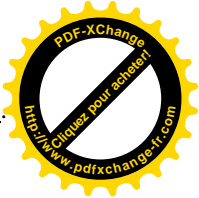
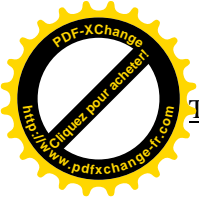
Pour les entreprises de production et distribution de l'énergie électrique exemple: LA SONELGAZ, Les abonnés importants et ceux de première catégorie ne tolèrent pas les pannes intempestives et surtout celles qui prennent beaucoup de temps tels que les avaries des transformateurs de puissance qui engendrent des pertes énormes pour la réparation et l'énergie non vendue, c'est pour ces raisons que la détection et le diagnostic des différents défauts des transformateurs de puissance s'avère indispensable et fait l'objet de plusieurs laboratoires de recherche.

A cet effet nous essaierons dans ce mémoire d'aborder ce sujet à travers d'abord une description des différents paramètres et accessoires constituant un transformateur de puissance, puis une étude de ses multiples parties avec une analyse du courant homopolaire et la mise en place d'une modélisation mathématique basée sur la méthode M2C.

Afin de procéder à une simulation numérique du défaut de court-circuit entre spires nous utilisons le logiciel MATLAB. Les résultats de simulation nous ont permis de déduire les constatations suivantes pour ce type de défaut : la sensibilité du :

- Courant homopolaire et la réaction des caractéristiques des inductances propres et mutuelles à l'intérieur d'un transformateur qui va nous permettre de juger son état par rapport au cas sain.
- Réaction des caractéristiques des inductances propres et mutuelles à l'intérieur d'un transformateur de puissance.

Grâce auxquelles nous pourrions juger son état par rapport au cas sain.



# TABLE DES MATIERES

Introduction générale..... 1

## **Chapitre 1 CONSTITUTION ET FONCTIONNEMENT D’UN TRANSFORMATEUR DE PUISSANCE..... 4**

**I.1. Principales définitions..... 5**

**I.2. Invention ..... 6**

**I.3. Types de Transformateurs ..... 7**

**I.3.1. Transformateur à colonnes ..... 7**

**I.3.2. Transformateur Cuirassé ..... 8**

### **I- CIRCUIT MAGNETIQUE ..... 8**

*a) Constitution ..... 8*

*b) Types de circuits magnétiques ..... 9*

*c) Section des colonnes ..... 10*

*d) assemblage colonne –cuirassé..... 10*

### **II – BOBINAGES..... 10**

**a) Emplacement ..... 10**

✓ Bobinage concentrique (en tonneau) ..... 10

✓ Bobinage mixte ..... 10

✓ Bobinage alterné en galettes ..... 10

**b) Réalisation ..... 11**

• Enroulement en cylindre ..... 11

• Enroulement en hélice ..... 11

### **II - ISOLATION ..... 11**

**a) Définition ..... 11**

**b) Accessoires ..... 12**

- Ecran de sécurité ..... 12

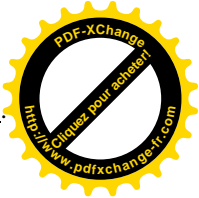
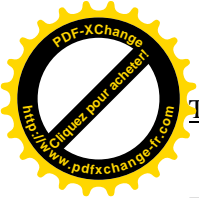
- Traversée isolante ..... 12

**c) Niveau d’isolement ..... 12**

### **IV – REFROIDISSEMENT ..... 12**

**a) différents modes de refroidissement ..... 12**

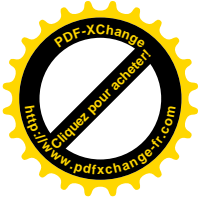
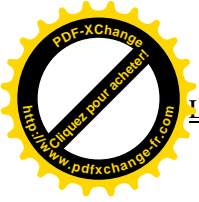
**b) Symboles désignant le type de refroidissement ..... 13**



- III- AUTRES ACCESSOIRES ..... 14**
  - **Prises de réglage ..... 14**
  - **Refroidissement ..... 15**
  - **Bornes ..... 15**
  - **Le coffret de raccordement et circuits auxiliaires ..... 15**
  - **Les accessoires ..... 15**
    - a- le conservateur ..... 15
    - b- le dessiccateur d'air (silicagel)..... 15
  - **Appareils et dispositifs de contrôle et de protection ..... 18**
    - 1- Eclateurs ..... 18
    - 2- Parafoudres ..... 18
    - 3- Protection masse cuve..... 19
    - 4- Protection différentielle ..... 19
    - 5- Image thermique ..... 19
    - 6- Thermostat ..... 19
    - 7- Indicateur de niveau de huile
    - 8- Prise de terre
    - 9- Accessoires et dispositifs divers
- IV- COUPLAGE DES TRANSFORMATEURS ..... 20**
  - 1) **modes de couplage ..... 20**
  - 2) **Indice horaire ..... 20**
- V- Conclusion ..... 20**

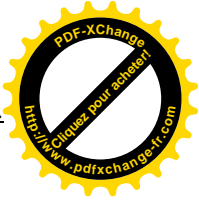
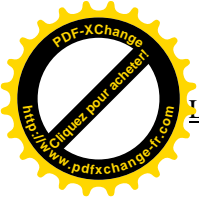
**Chapitre 2 DÉFAUTS ET MODELISATION DES  
ANSFORMATEURS DE PUISSANCE**

- Introduction ..... 23**
- I. 1 Défauts et leurs causes ..... 23**
  - I. 1.1 Défauts ..... 23**
    - ◆◆◆ défauts liés à la fabrication ..... 23
    - ◆◆◆ défauts d'ordre mécanique ..... 24
    - ◆◆◆ défauts d'ordre atmosphérique ..... 24
    - ◆◆◆ défaut d'ordre électrique ..... 25
  - I. 1.2 Les causes ..... 26**
  - I. 1.3 La mesure ..... 27**
- II. Structure du Transformateur ..... 27**



# Liste des tableaux

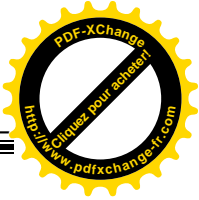
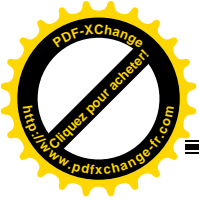
<b>Table 2-1: Les paramètres des essais du transformateur .....</b>	<b>28</b>
<b>Table 2-2 : Détails sur les enroulements du transformateur .....</b>	<b>28</b>
<b>Table 2-3 : Caractéristiques géométriques des enroulements .....</b>	<b>28</b>
<b>Tableau 3.1 : Différentes cas possible pour un défaut de court circuit d'un transformateur de puissance .....</b>	<b>46</b>



# Liste des symboles

- $a_1, a_2$  : Dimension primitive de spire rectangulaire [m]  
 $A, A^*$  : Potentiel vecteur magnétique (\* modifié) [T.m]  
 $b_1, b_2$  : Dimension primitive de spire rectangulaire [m]  
 $B$  : Induction magnétique [T]  
 $E$  : Champ électrique [V.m<sup>-1</sup>]  
 $Ln$  : Logarithme Népérien  
 $M$  : Inductance mutuelle [H]  
 $n$  : Normale unitaire (orientée) à la surface  
 $N_1, N_2$  : Nombre de spire des enroulements primaire/secondaire  
 $N_c$  : Nombre de couche de conducteur  
 $r_c$  : Rayon d'un conducteur circulaire [m]  
 $r_1, r_2$  : Rayon primitif d'une spire (cas axisymétrique) [m]  
 $\psi$  : Flux magnétique totale/élémentaire [Wb]  
M2C : Méthode des circuits couplés  
 $i_A, i_B, i_C$  : Courants des phases  
 $i_{H0}$  : Courant Homopolaire  
 $\rho$  : Le module du courant *Homopolaire* nous informe sur la gravité du défaut  
 $\beta$  : Le déphasage du courant *Homopolaire* nous précise la phase en défaut  
 $[V_p]$  Le vecteur des tensions des phases primaires  
 $[I_p]$  Le vecteur des courants de phases primaires  
 $[\phi_p]$  Le vecteur des flux traversant les phases primaires  
 $[R_p]$  La matrice diagonale des résistances des phases du primaire  
 $[L_{pp}]$  La matrice inductances propres et mutuelles des phases primaires  
 $[L_{ps}]$  La matrice inductances mutuelles entre les phases primaires et les spires secondaires  
 $[V_s]$  Le vecteur des tensions des phases secondaires  
 $[I_s]$  Le vecteur des courants de phases secondaires  
 $[\phi_s]$  Le vecteur des flux traversant les phases secondaires  
 $[R_s]$  La matrice diagonale des résistances des phases du secondaire  
LpA Inductance propre phase primaire A  
MpApB Inductance mutuelle primaire A primaire B  
MpAsa Inductance mutuelle primaire A secondaire a





## Introduction générale

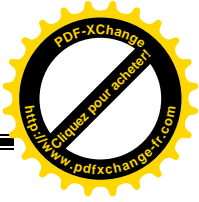
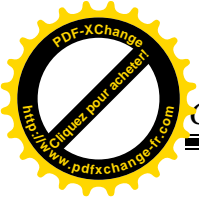
L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement non seulement de point de vu quantitative mais aussi qualitative. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est à première vue nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs etc., ce qui implique une augmentation de coût et une dégradation du milieu naturel. En conséquence, il est aujourd'hui important d'avoir des réseaux maillés et de travailler proche des limites de stabilité afin de satisfaire ces nouvelles exigences.

Les réseaux maillés, soumis à des boucles de puissance indésirables entre zones interconnectées, subissent des surcharge de lignes, des problèmes de stabilité et de toute manière un accroissement des pertes ce qui ne repend pas au critères de la qualité de l'énergie électrique . Les moyens classiques de contrôle des réseaux : compensateurs série ou parallèle commutés par disjoncteurs, modification des consignes de production, changement de topologie du réseau et action sur l'excitation des générateurs, transformateur à prises réglables en charge, transformateurs déphaseurs mais ce dernier moyen du transformateur est un siège de multiples défauts.

Certains consommateurs de l'énergie électrique ne tolèrent pas les pannes intempestives. Les défauts qui apparaissent dans un équipement électrique ont des causes variées. Ils peuvent êtres dus au vieillissement des constituants du transformateur ou bien aux conditions d'utilisation ou tout simplement à un défaut de fabrication dont l'effet serait imperceptible lors de la mise en service.

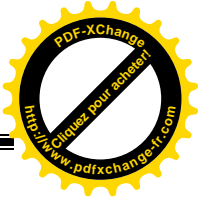
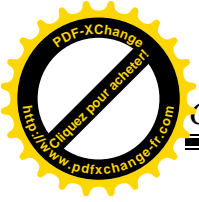
Ces pannes peuvent êtres d'origines Thermique (échauffement sur borne HT ou BT, échauffement du bobinage, huile, papier isolante) ou électrique et magnétique (court circuit du bobinage, déclassement de qualité d'huile, papier isolante ....). Des imperfections peuvent aussi être dues à d'autres éléments de l'entraînement, telles que des défauts dans l'alimentation, dans la charge ou dans les raccordements MT ou BT.

Afin d'éviter des défauts intempestifs, il est possible d'effectuer une maintenance périodique durant laquelle les éléments de réseau sont remplacés après une durée d'utilisation finie. Une telle maintenance présente



# CHAPITRE 1

## CONSTITUTION ET FONCTIONNEMENT D'UN TRANSFORMATEUR DE PUISSANCE



# CHAPITRE 1

## CONSTITUTION ET FONCTIONNEMENT D'UN TRANSFORMATEUR DE PUISSANCE

### I.1. Principales définitions

Le transformateur est un appareil électromagnétique statique destiné à transformer un courant alternatif primaire en un autre courant secondaire de même fréquence ayant dans le cas général d'autres caractéristiques en particulier, une autre tension et un autre courant.

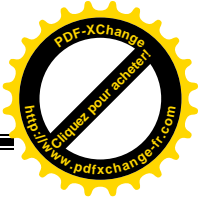
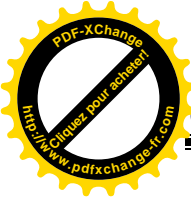
Un transformateur se compose d'un noyau en tôles d'acier à transformateur, de deux ou de plusieurs enroulements à couplage électromagnétique et dans le cas particulier d'un autotransformateur, à couplage électrique.

Selon le nombre d'enroulements, le transformateur est dit à deux, trois ou à plusieurs enroulements. Conformément au genre du courant on distingue, les transformateurs monophasés, triphasés et polyphasés. On entend par enroulement d'un transformateur polyphasés l'ensemble de tous les enroulements de phase de même tension reliés entre eux d'une certaine façon. L'enroulement du transformateur auquel est amenée l'énergie du courant alternatif est appelé enroulement primaire et l'autre enroulement duquel l'énergie est prélevée est appelé enroulement secondaire. Conformément aux appellations des enroulements toutes les grandeurs qui se rapportent à l'enroulement primaire, par exemple la puissance, le courant, la résistance, etc., sont également appelées primaires et celles qui se rapportent à l'enroulement secondaire sont dites secondaires.

L'enroulement connecté au réseau à tension plus élevée est appelé enroulement de haute tension (HT) ; l'enroulement connecté au réseau de tension inférieure est appelé enroulement de basse tension (BT). Si la tension secondaire est inférieure à celle primaire le transformateur est appelé transformateur abaisseur, et lorsque cette tension est supérieure à la tension primaire le transformateur est dit transformateur élévateur.

On appelle transformateur à prises un transformateur dont les enroulements sont dotés des prises spéciales permettant de varier le rapport de transformation.

Pour prévenir l'action néfaste de l'air sur l'isolement des bobines et améliorer le refroidissement du transformateur on place son noyau avec les



enroulements dans une cuve remplie d'huile à transformateur. Ces transformateurs sont appelés transformateurs dans l'huile. Ceux qui ne sont pas plongés dans l'huile sont appelés transformateurs secs. [Kostinko-372]

## I.2. Invention

*Lucien Gaulard*, jeune électricien français, présente à la *Société française des Electriciens*, en 1884, un « générateur secondaire », dénommé depuis transformateur.

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 2000 volts à l'aide de transformateurs avec un noyau en forme de barres.

En 1884 *Lucien Gaulard* met en service une liaison bouclée de démonstration (133 Hz) alimentée par du courant alternatif sous 2000 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*, *Mikszá Déry* et *Otto Titus Bláthy* mettent au point un transformateur avec un noyau annulaire commercialisé dans le monde entier par la firme Ganz à Budapest. Aux USA, W. Stanley développe des transformateurs.

### I.3. Types de Transformateurs

Vers la fin des années 1885 et après avoir pris possession de la licence d'exploitation des brevets nécessaires, George Westinghouse développe un nouveau type de transformateur. Pour ce modèle, le circuit magnétique entoure entièrement les enroulements d'où son nom de "cuirassé". Plus tard, dans un souci de facilité de conception, une version à "colonnes" de ce transformateur fut conçue. Ces deux types de transformateurs sont encore aujourd'hui les plus employés [01]. La puissance des transformateurs varie de quelques KVA à plusieurs centaines de MVA. Les tensions d'usage commencent, quant à elles, à quelques centaines de volts, sur les réseaux de distribution, pour atteindre plusieurs centaines de kilovolts en sortie des centres de production. Le choix d'un type de transformateur sur cette large gamme dépend non seulement des contraintes électriques, mécaniques et thermiques, mais également des problèmes d'encombrements et économiques. Toutefois, la majorité des équipements commercialisés concernent des transformateurs à colonnes, de distribution et d'une puissance allant de quelques dizaines à quelques centaines de kVA [01].

#### I.3.1. Transformateur à colonnes

Le transformateur à colonnes est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur un noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités via des culasses afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique [01].

Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique de manière à maximiser le couplage tout en minimisant le volume des conducteurs. Les conducteurs sont de dimensions variables et de topologies multiples, selon les puissances mises en jeu.



Figure I.1 - Transformateur à colonnes à flux forcé

Le transformateur triphasé ainsi constitué est donc composé de trois paires de bobinages indépendantes et par la suite connectées entre elles selon différents

schémas récurrents. Ces couplages permettent notamment l'adaptation des niveaux de courant et de tension aux caractéristiques nominales du transformateur au sein de son réseau. On retrouve ainsi des couplages dits en "étoile", en "triangle", ou en "zig-zag", voire d'autres, dérivés de ceux-ci et permettant la compensation de certains courants harmoniques.

### I.3.2. Transformateur Cuirassé

Pour ce type de transformateur, le circuit magnétique entoure complètement le bobinage, ce qui lui confère un fonctionnement à "flux libre". La cuve assure le serrage de l'ensemble et le transformateur ainsi constitué est alors assuré d'une excellente rigidité mécanique associée à une grande compacité. En contrepartie, le confinement résultant rend plus difficile le refroidissement de l'ensemble.

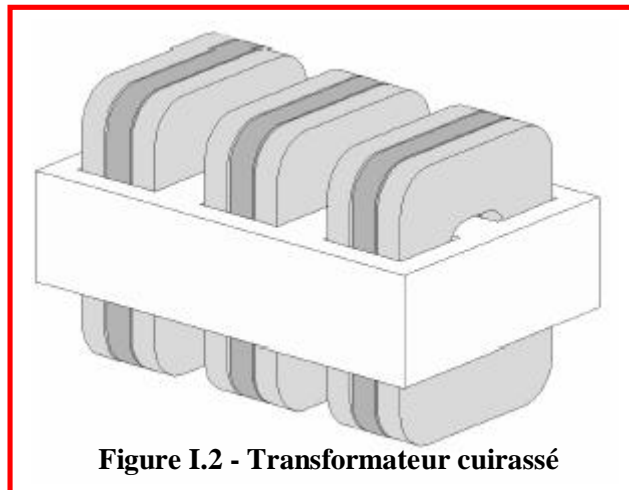


Figure I.2 - Transformateur cuirassé

Ces transformateurs sont utilisés principalement au sein des réseaux de transport et de répartition, où les surtensions transitoires sont fréquentes. Dans cet environnement, ils doivent se prémunir des effets néfastes, voire dévastateurs de ces surtensions sur les enroulements [01]. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobinages.

#### I- CIRCUIT MAGNETIQUE :

##### a) Constitution:

Son rôle essentiel est de canaliser le flux.

Pour augmenter la perméabilité magnétique et donc la diminution de la f.e.m et du courant nécessaire pour maintenir le flux voulu ; on utilise un acier spéciale : l'acier au silicium (à grains orientés). Pour diminuer les pertes par courants de Foucault on utilise des tôles isolées les unes des autres :

- Par phosphatation : dépose par traitement thermochimique
  - Par vernis synthétique : application d'une résine en solution dans l'alcool qui se polymérise et durcit sous l'action de la chaleur
- Résistance de l'isolant : 10 à 20  $\Omega/\text{cm}^2$   
Epaisseur de la tôle : 0.30 à 0.35 mm

**b) Types de circuits magnétiques :**

Dans le circuit magnétique on distingue les colonnes sur les quels reposent les bobines, des culasses fermants le circuit.

Suivant l'emplacement de ces deux composants on distingue trois types de circuits :

- Circuit magnétique cuirassé : on aura
  - Circuit à 5 colonnes : on aura le flux magnétique de retour a un module très faible devant
  - Circuit à 3 colonnes : c'est le type le plus utilisé.

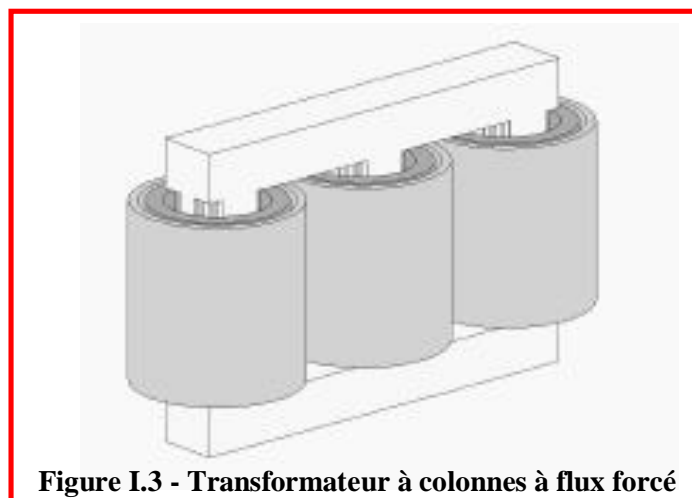
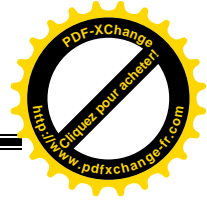
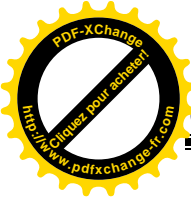


Figure I.3 - Transformateur à colonnes à flux forcé

Le transformateur triphasé ainsi constitué est donc composé de trois paires de bobinages indépendantes et par la suite connectées entre elles selon différents schémas récurrents. Ces couplages permettent notamment l'adaptation des niveaux de courant et de tension aux caractéristiques nominales du transformateur au sein de son réseau. On retrouve ainsi des couplages dits en



"étoile", en "triangle", ou en "zig-zag", voire d'autres, dérivés de ceux-ci et permettant la compensation de certains courants harmoniques.

### c) Section des colonnes :

Si pour les faibles puissances les sections sont carrées, on réalise des sections circulaires pour les grandes puissances. En effet, les bobines sont à section circulaire pour des raisons de résistance aux efforts électrodynamiques entre spires en cas de court-circuit ainsi que pour une réalisation plus facile.

Pour avoir une meilleure utilisation du fer on doit donc se rapprocher de la section circulaire ; on y parvient en réalisant des gradins.

Pour des puissances plus grandes les sections des colonnes comportent des canaux de refroidissement.

### d) assemblage colonne – cuirassé :

La réalisation de joints magnétiques qui réduisent le plus possible l'entrefer permet d'obtenir la réductance minimale du circuit donc des pertes faibles. :

\*\_ Joints enchevêtrés : les extrémités des tôles de la colonne et de la culasse sont enchevêtrés les unes avec les autres

\*\_ Joints à coupe oblique :

Dans le cas des tôles à cristaux orientés qui favorisent le passage du flux dans le sens du laminage, le joint doit être à 45°. Dans ce cas il faut un faible recouvrement obtenu en décalant le joint.

Le serrage des tôles est effectué par des tiges filetées, régulièrement répartis et isolés du circuit magnétique. Le serrage et l'assemblage des culasses et des noyaux sont obtenus par des matériaux non magnétiques.

## **II - BOBINAGES :**

### a) Emplacement:

Selon l'emplacement des enroulements sur les colonnes on distingue :

✓ Bobinage concentrique (en tonneau):

L'enroulement BT est placé près de la colonne car la distance d'isolation entre la bobine et la colonne sera la plus faible.

✓ Bobinage mixte :

Pour éviter les très forts ddp entre les spires d'extrémité de deux couches successives, on réalise des bobines plates (galettes) qui sont montées en série les unes avec les autres.

Utilisé surtout en HT et THT

✓ Bobinage alterné en galettes :

Les galettes MT et BT sont alternées, l'empilage est terminé par les galettes BT plus faciles à isoler du circuit magnétique.



Image : B. REKIK



Figure I.4 - Bobinage BT

Image : B. REKIK



Figure I.5 - Bobinage MT

### **b) Réalisation :**

Suivant le mode de réalisation de bobinage on distingue les bobines en cylindre des ceux en hélice

- Enroulement en cylindre :

Ils sont soit en une seule couche, soit en plusieurs couches

Ils sont utilisés surtout comme bobinage BT pour des courants  $< 800$  A en conducteur plat

Les bobines cylindriques en plusieurs couches en conducteur à section circulaire sont utilisés comme enroulement HT pour une tension  $< 36$  kv

- Enroulement en hélice :

la bobine est composée de spires utilisant de 4 à 20 conducteurs de section carrée en parallèle.

Pour diminuer les pertes du au non symétrie de distribution du flux, on réalise une transposition des conducteurs au sein des spires.

Les enroulements en hélice sont les plus robustes et sont utilisés comme bobinage BT pour des transformateurs de grande puissance ( $I > 300$  A )

## **II - ISOLATION :**

### **a) Définition :**

On distingue l'isolation principale et longitudinale.

L'isolation principale comprend : l'isolation entre bobinage, entre bobine et circuit magnétique et entre bobine et bac.

L'isolation principale est assuré par de l'huile et des écrans (cartons isolants).Le bac étant remplie d'huile.

L'isolation longitudinale comprend l'isolation entre spires et entre couches d'une même bobine.

Image : B. REKIK



Figure I.6 - Les écrans en cartons isolants

**b) Accessoires :**

- Ecran de sécurité :

C'est une spire ouverte d'une bande de cuivre relié à la masse, placée entre l'enroulement HT et BT. Cet écran peut jouer le rôle d'écran électrostatique en empêchant la transmission des parasites du HT vers BT. Elle doit être reliée à la terre

- Traversée isolante :

Elles assurent les liaisons électriques entre les enroulements et les circuits électriques extérieurs .C'est une borne isolante qui doit permettre :

- L'isolement de la liaison par rapport au couvercle
- D'assurer l'étanchéité de la liaison.
- De posséder une résistance mécanique suffisante.

**c) Niveau d'isolement :**

En exploitation, la tension diffère de la tension nominale suite au chutes de tension et de régulation de la tension source. Dans tout les cas la tension ne doit pas dépasser un plafond appelé niveau d'isolation pour le quel l'isolation perd ses caractéristiques.

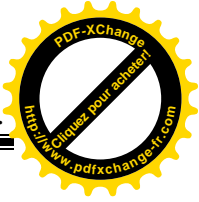
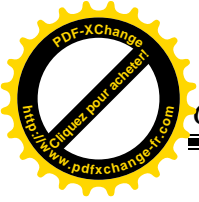
En général,  $NI = (1.1 \text{ à } 1.15) U_n$

Ex pour  $U_n = 22 \text{ kv}$   $NI = 22 * 1.1 = 24 \text{ kv}$

**IV – REFROIDISSEMENT :**

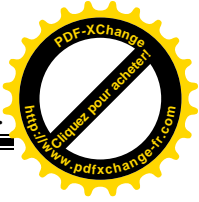
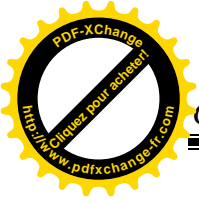
**a) différents modes de refroidissement :**

Les pertes par effet Joule dans les enroulements et par hystérisis et courants de foucault dans le circuit magnétique provoquent l'échauffement.



# CHAPITRE 2

## DÉFAUTS ET MODELISATION DES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE



## CHAPITRE 2

### DÉFAUTS ET MODELISATION DES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE

#### Introduction

Ce chapitre présente les types de défauts dans un transformateur de puissance et le moyen de les diagnostiquer au vu des inductances propres et mutuelles du son bobinage primaire et secondaire ainsi que les caractéristiques du courant homopolaire.

#### I. 1 Défauts et leurs causes

L'étude des défauts des transformateurs de puissance a un double objectif :

- ◆ Comprendre leur genèse de manière à prévoir leur gravité et leur développement.
- ◆ Analyser leur impact sur le comportement de transformateur et en déduire les signatures permettant, à posteriori, de remonter jusqu'à la cause de la défaillance.

#### I. 1.1 Défauts

Les principaux défauts intervenants dans le fonctionnement d'un transformateur de puissance :

##### ◆◆◆ défauts liés à la fabrication

- Le mélange des impuretés dans l'alliage constituant le circuit magnétique.
- Le non isolement des conducteurs des enroulements primaire ou secondaire.
- Mauvaise étanchéité au niveau des bornes HT ou BT.

Un tel défaut peut provoquer une fuite d'huile. En effet, la sur-échauffement du bobinage, accroissant ainsi les risques des courts circuits.

Image : B. REKIK



◆◆◆ défauts d'ordre mécanique

- *Déformation du circuit magnétique.*

Figure II.1- Défaut de circuit magnétique « déformation »

- Défauts liés conditions de transport.
- Percement de la cuve qui provoque les fuites d'huile.
- Les fissures ou les cassures de isolateurs des bornes HT /BT.
- *Le mauvais serrage des connections HT/BT provoque leurs l'échauffement.*

Image : B. REKIK



Figure II.2- Défaut suite au mauvais serrage sur borne BT

◆◆◆ défauts d'ordre atmosphérique

- L'humidité
- La chaleur excessive
- *Les foudres*

Image : B. REKIK



Figure II.3- Défaut à cause d'une foudre

◆◆◆ défaut d'ordre électrique

Un tel défaut peut résulter d'un court-circuit ou d'un circuit ouvert au niveau du bobinage primaire ou secondaire. Un court-circuit provoque une augmentation de la température à l'intérieur de transformateur, ce qui conduit à la détérioration des isolants des conducteurs. Le transformateur est donc déséquilibré.

- Les surtensions suite au mauvais contacts.
- Les manques phases de la source HT.
- Les surcharges des transformateurs de puissances (  $Kch > 100\%$  ).
- Le déséquilibre des charges sur les trois phase BT.
- *Court circuit entre spires*

Image : B. REKIK



**Figure II.4- Défaut de court circuit**

Parmi les méthodes utilisées, on a celle qui doit prélever un ou plusieurs signaux pour les traiter ou échantillons pour essais, les analyser, et conclure à une défaillance ou non, avec certitude.

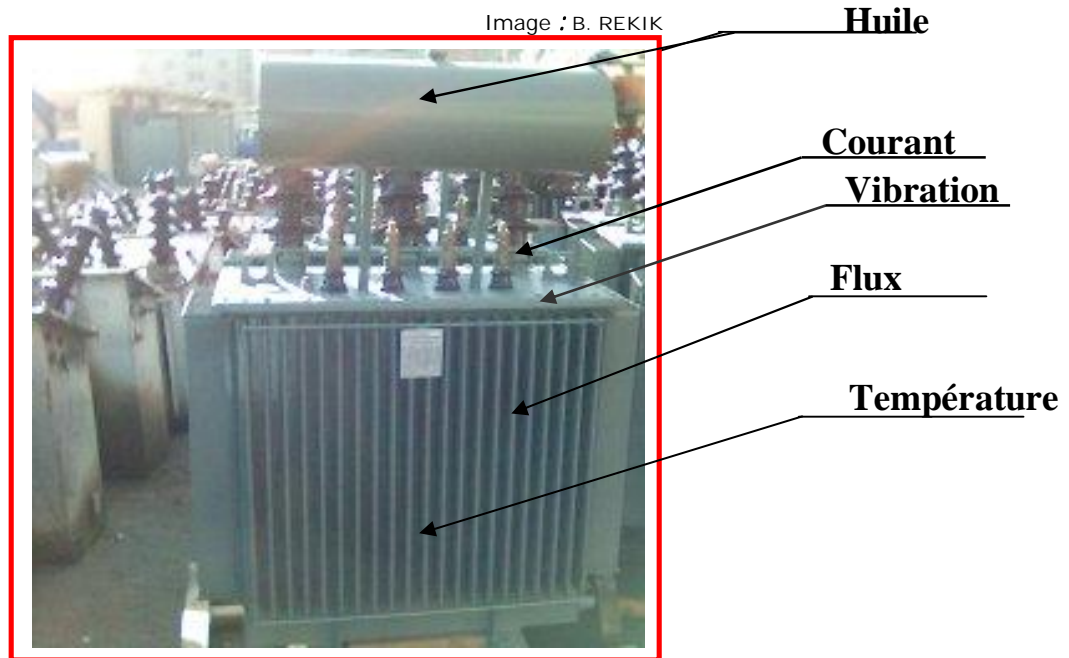


Figure II.5- Les points de mesure

### I. 1.2 Les causes

Les causes des défauts sont multiples. Elles peuvent être classées en trois groupes :

- ◆ Les initiateurs de défauts : surchauffe du transformateur, usures des éléments des contacts, cassures des isolateurs de bornes HT,BT de fixations, problème d'isolation électrique notamment du bobinage, surtension transitoire...
- ◆ Les contributeurs aux défauts : surcharge fréquente, température ambiante élevée, ventilation défaillante, humidité, mauvaise terre, vieillissement...
- ◆ Les défauts sous jacents et erreurs humaines : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées (fusibles sur calibrer), fausses manœuvres côté HT, absence de maintenance...

Les effets sont principalement dus à un problème : thermique, électrique, et environnemental, électromagnétique.

### I. 1.3 La mesure

Les paramètres caractéristiques d'un transformateur de puissance peuvent servir de très bons indicateurs de défaut sont :

- ➔ Le courant primaires ou secondaire ;
- ➔ Le flux magnétique ;
- ➔ Les vibrations ;
- ➔ La température ;
- ➔ La qualité d'huile;

### II. Structure du Transformateur

La figure II.6 montre la géométrie et structure du transformateur qui sera étudié dans notre travail. C'est un transformateur triphasé à deux enroulements. Le noyau de fer est de type de 3 colonnes et 2 culasses. Pour chaque phase le primaire (HT) et le secondaire (BT) sont montés sur une même colonne, la HT est extérieure et la BT est à l'intérieur.

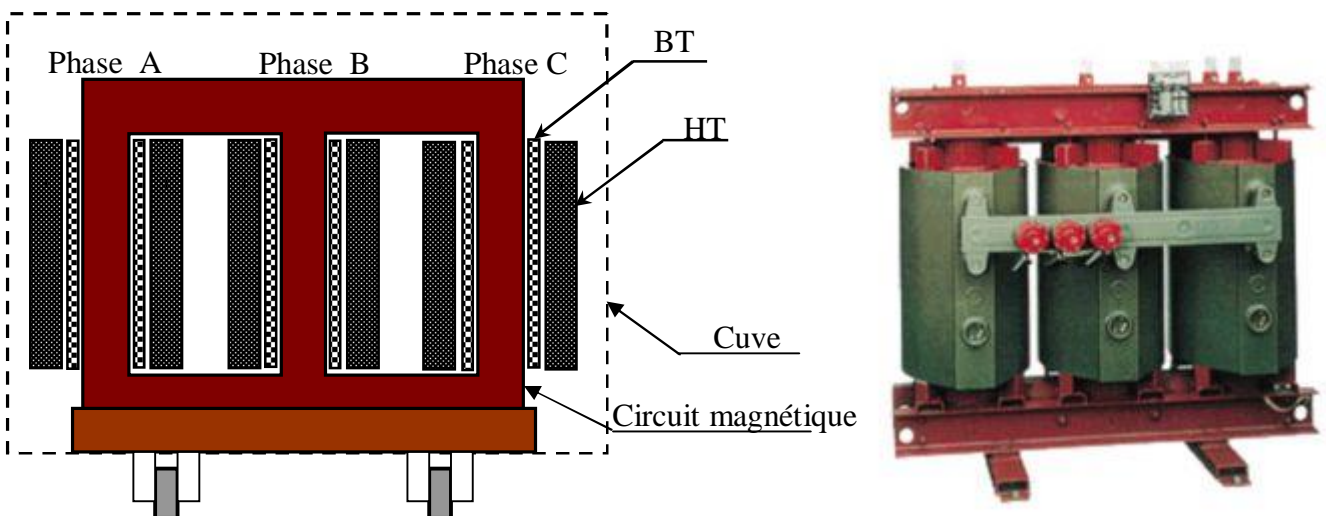


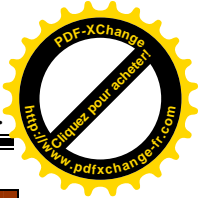
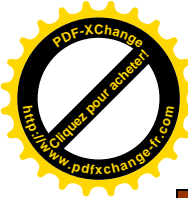
Figure II.6- Structure du transformateur étudié

Pour comprendre mieux la structure du transformateur, quelques détails sur les essais et sur les enroulements de HT et BT sont montrés dans les tables 2.1 ; 2.2 et 2.3, respectivement. [A. LEFEVRE 01]

Puissance nominale	Couplage HT/BT	Rapport de tension	Perte à vide ( P <sub>0</sub> )	Perte en charge
75 KVA	Dyn11	600/208	450 W	2948 W

Table 2-1: Les paramètres des essais du transformateur





	BT	HT
Technologie de bobinage	Couche avec conducteur Bande (Feuillard)	VRAC avec conducteur fil rond émaillé
Matière	Aluminium	Aluminium

Table 2-2 : Détails sur les enroulements du transformateur

<i>Enroulement secondaire BT</i>	34 spires réparties en 2 couches
Conducteurs (alternance nu et isolé)	$0.142 \times 0.286 + 0.144 \times 0.288$
Profil radial de l'enroulement	17 spires - cale 0.375 - 17 spires
Rayon intérieur initial à la surface	$\approx 2.35$
<i>Inter couche</i>	cale 0.375
<i>Enroulement primaire HT</i>	178 spires réparties en 2 couches
Conducteurs (isolé)	Carré de 9 : $0.1096 \times 0.1096$
Profil radial de l'enroulement	89 spires - cale 0.250 - 89 spires
Prise de la couche extérieure	à 161, 166, 170, 174,

Table 2-3 : Caractéristiques géométriques des enroulements (en pouce, 1 pouce=25.4mm)

### III. Modélisation d'un Transformateur de puissance

Dans cette partie, nous allons développer le modèle analytique d'un transformateur de puissance à partir d'équations générales dans l'espace de phase. Puis, on va calculer les différentes inductances de transformateur, ces dernières sont se groupées dans des matrices comme le sont les composantes résistives. En suite, on déterminera analytiquement les différentes fonctions intervenant dans le calcul des inductances.

#### III. 1 Modèle complet d'un transformateur de puissance

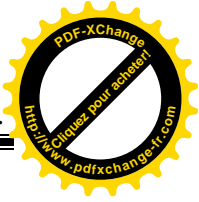
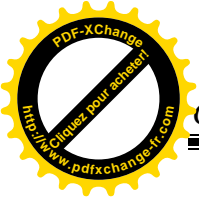
##### III. 1.1 Modélisation de transformateur

Considérons initialement que le transformateur est constituée d'un bobinage primaire reparti et d'un secondaire de section de fil différent. Le modèle proposé est basé sur une approximation de circuit couplée magnétique.

Ces bobinages primaire et secondaire on suppose qu'ils sont formé de  $m$  phases constituées chacune par des bobines mises en séries réparties régulièrement dans des encoches sur la totalité de son circuit magnétique.[6],[7]

La détermination du modèle d'un transformateur est basée sur les hypothèses suivantes :

- Le fer est de perméabilité infinie ;
- Le circuit magnétique est linéaire.



### III. 1.2 Mise en équations dans l'espace de phase

#### III. 1.2-a Equation du circuit primaire

On peut mettre les tensions des phases primaires sous la forme suivante :

$$[V_p] = [R_p][I_p] + \frac{d}{dt}[\phi_p] \tag{3.1}$$

Où :

- $[V_p]$  Le vecteur des tensions des phases primaires
- $[I_p]$  Le vecteur des courants de phases primaires
- $[\phi_p]$  Le vecteur des flux traversant les phases primaires
- $[R_p]$  La matrice diagonale des résistances des phases du primaire

$$[V_p] = [V_{p1} \ V_{p2} \ \dots \ V_{pn}]$$

$$[R_p] = \begin{bmatrix} R_{p1} & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & R_{p2} & 0 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & 0 & R_{pn} \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

est de l'ordre (m,m)

$$[I_p] = [I_{p1} \ I_{p2} \ \dots \ I_{pn}]$$

$$[\phi_p] = [L_{pp}][I_p] + [L_{ps}][I_s]$$

Avec :

La matrice inductances propres et mutuelles des phases primaires est de l'ordre (m, m).

$$[L_{pp}] = \begin{bmatrix} L_{p1p1} & L_{p1p2} & \dots & L_{p1pm} \\ L_{p2p1} & L_{p2p2} & \dots & L_{p2pm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{pmp1} & \dots & \dots & L_{pmpm} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

La matrice inductances mutuelles entre les phases primaires et les spires secondaires est de l'ordre (m, q).

$$[L_{ps}] = \begin{bmatrix} L_{p1s1} & L_{p1s2} & \dots & L_{p1sq} \\ L_{p2s1} & L_{p2s2} & \dots & L_{p2sq} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{pms1} & L_{pms2} & \dots & L_{pmsq} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

### III. 1.2-b Equations du secondaire

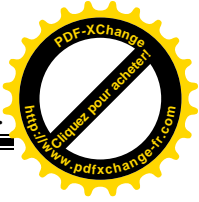
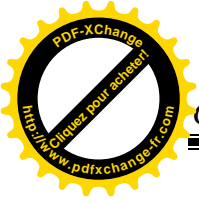
De la même façon pour le bobinage secondaire du transformateur, on peut écrire son équation générale est sous la forme suivante :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\phi_s] \quad (3.5)$$

- $[V_s]$  Le vecteur des tensions des phases secondaires
- $[I_s]$  Le vecteur des courants de phases secondaires
- $[\phi_s]$  Le vecteur des flux traversant les phases secondaires
- $[R_s]$  La matrice diagonale des résistances des phases du secondaire

Le flux total du secondaire est donnée par l'équation suivante :

$$[\Phi_s] = [L_{sp}][I_p] + [L_{ss}][I_s]$$



- La matrice des inductances mutuelles entre les spires du secondaires et les phases primaires est de l'ordre (n, m)

$$[L_{sp}] = \begin{bmatrix} L_{s1p1} & L_{s1p2} & \dots & L_{s1pm} \\ L_{s2p1} & L_{s2p2} & \dots & L_{s2pm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{snp1} & \dots & \dots & L_{snpm} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

La matrice des inductances propres et mutuelles du rotor est de l'ordre (q+1, q+1)

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{s1s1} & L_{s1s2} & \dots & L_{s1sm} \\ L_{s2s1} & L_{s2s2} & \dots & L_{s2sm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{sms1} & \dots & \dots & L_{smsm} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Si on regroupe les deux équations du primaire et du secondaire en une seule on aura :

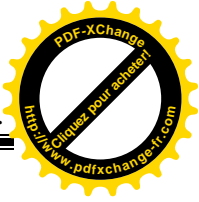
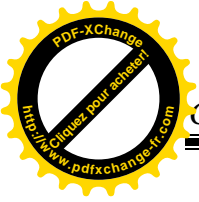
$$[V_p] = [R_p][I_p] + \frac{d}{dt}[L_{pp}][I_p] + [L_{pp}]\frac{d}{dt}[I_p] + \frac{d}{dt}[L_{ps}][I_s] + [L_{ps}]\frac{d}{dt}[I_s]$$

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[L_{sp}][I_p] + [L_{sp}]\frac{d}{dt}[I_p] + \frac{d}{dt}[L_{ss}][I_s] + [L_{ss}]\frac{d}{dt}[I_s]$$

$$\begin{bmatrix} [V_p] \\ [V_s] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R_p] & [0] \\ [0] & [R_s] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_p] \\ [I_s] \end{bmatrix} + \omega \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} [L_{pp}] & [L_{ps}] \\ [L_{sp}] & [L_{ss}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L_{pp}] & [L_{ps}] \\ [L_{sp}] & [L_{ss}] \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [I_p] \\ [I_s] \end{bmatrix}$$

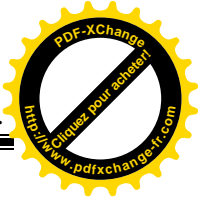
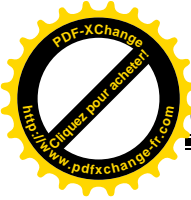
Sachant que :

$$\omega \frac{d}{d\theta} [L][I] = 0$$



# CHAPITRE 3

## ETUDE ET SIMULATION DU DÉFAUT DE COURT CIRCUIT



## CHAPITRE 3

### ETUDE ET SIMULATION DU DÉFAUT DE COURT CIRCUIT

#### Introduction

Dans ce chapitre on s'intéressera à l'étude par simulation numérique du défaut de court circuit au bobinage primaire et secondaire. La présence d'un tel défaut dans transformateur de puissance impose une variation de courant donc des inductances de valeurs différentes en fonction de nombre de spires en court circuit et leurs positions par rapport à un axe de référence. Ainsi, on va modéliser la fonction de potentiel vecteur et calculer analytiquement les inductances propres et mutuelles primaires et secondaires. Les résultats de simulation seront présentés.

#### I. Défaut de Court circuit

Le court-circuit de spires est donc le défaut le plus nuisible et le plus fréquemment rencontré au bobinage du transformateur, même si les risques d'ouverture de phase (conducteur coupé) demeurent physiquement réalisables. En effet, on a vérifié expérimentalement que le courant circulant dans les spires en court-circuit est dix fois plus important que le courant nominal. L'augmentation de la température qui s'en suit entraîne la destruction en cascade des isolants et par effet cumulatif, la destruction complète de transformateur.

Comme les fils en cuivre sont dimensionnés pour une certaine gamme de puissance, un échauffement anormal peut être à l'origine d'une destruction des isolants mettant ainsi en court-circuit plusieurs spires de la bobine. Ce défaut est de loin le plus répandu et le plus dangereux dans le cas de la bobine d'un transformateur.

Au contraire du défaut précédent qui a pour effet de réduire simplement le nombre de spires de la bobine, un court-circuit est à l'origine d'un nouveau bobinage court-circuité parcouru par un fort courant induit noté  $i_{cc}$ . Il en résulte un champ magnétique additionnel  $H_{cc}$  dans la bobine ayant la même direction que le champ nominal. Il apparaît donc deux bobinages :

- le bobinage principal dont le nombre de spires se trouve réduit à  $N_s - N_{cc}$  spires (où  $N_{cc}$  est le nombre de spires en court-circuit). Ce bobinage est parcouru par un courant noté  $i$  à l'origine du champ principal (mode commun),
- le bobinage de  $N_{cc}$  spires en court-circuit avec une excitation magnétique notée  $H_{cc}$  (mode différentiel), orienté selon le même axe que l'excitation principale.

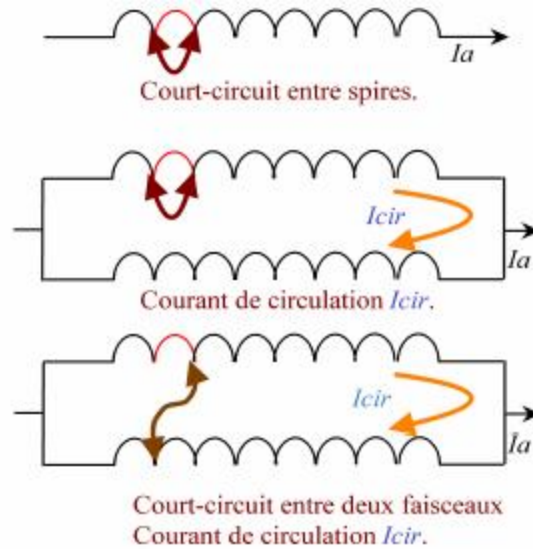


Figure III – Court circuit entre spires

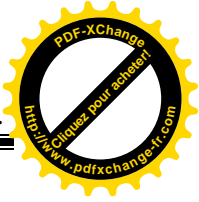
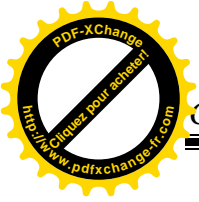
## II. Localisation de la phase en défaut de court circuit

A partir du système triphasé des courants :

$$\begin{cases} i_A(t) = I_{mA} * \sin(\omega t) \\ i_B(t) = I_{mB} * \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_C(t) = I_{mC} * \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (3.1)$$

Sachant que

$$\begin{cases} I_{mA} = I_A + \Delta I_A \\ I_{mB} = I_B + \Delta I_B \\ I_{mC} = I_C + \Delta I_C \end{cases}$$



$\Delta I_A, \Delta I_B, \Delta I_C$  : les valeurs de courant ajouter suite au défaut de court circuit

On calculant le courant *Homopolaire* :

$$i_{H0} = i_A(t) + i_B(t) + i_C(t) \tag{3.2}$$

Après simplification ( voir *annexe - A-* )on a la formule générale (3.3) qui fait apparaître le défaut de court circuit du bobinage d'un transformateur de puissance :

$$i_{H0} = (\Delta i_A - 0.5 * \Delta i_B - 0.5 * \Delta i_C) * Sin(\omega t) - \frac{\sqrt{3}}{2} * (\Delta i_B - \Delta i_C) * Cos(\omega t) \tag{3.3}$$

Si on fait le changement des variables suivant :

$$A = \rho * \cos(\beta) = (\Delta_{iA} - 0.5 * \Delta_{iB} - 0.5 * \Delta_{iC})$$

$$B = \rho * \sin(\beta) = -\frac{\sqrt{3}}{2} (\Delta_{iB} - \Delta_{iC}) \tag{3.4}$$

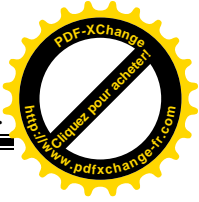
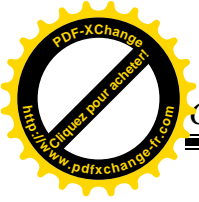
Cela implique que :

$$\rho = \sqrt{A^2 + B^2}$$

Et :

$$\beta = \text{atn}\left(\frac{B}{A}\right)$$



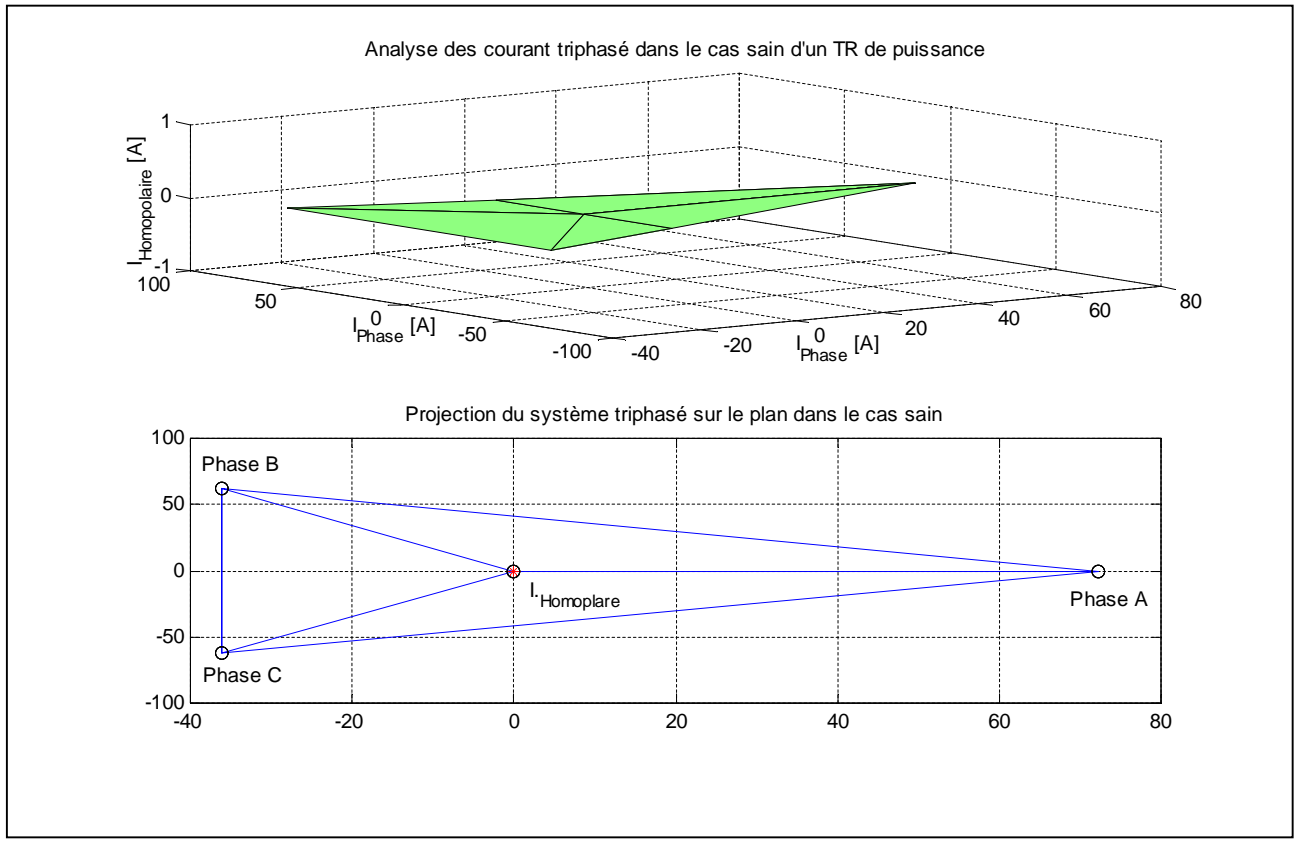


- $\rho$  : Le module du courant *Homopolaire* nous informe sur la gravité du défaut
- $\beta$  : Le déphasage du courant *Homopolaire* nous précise la phase en défaut

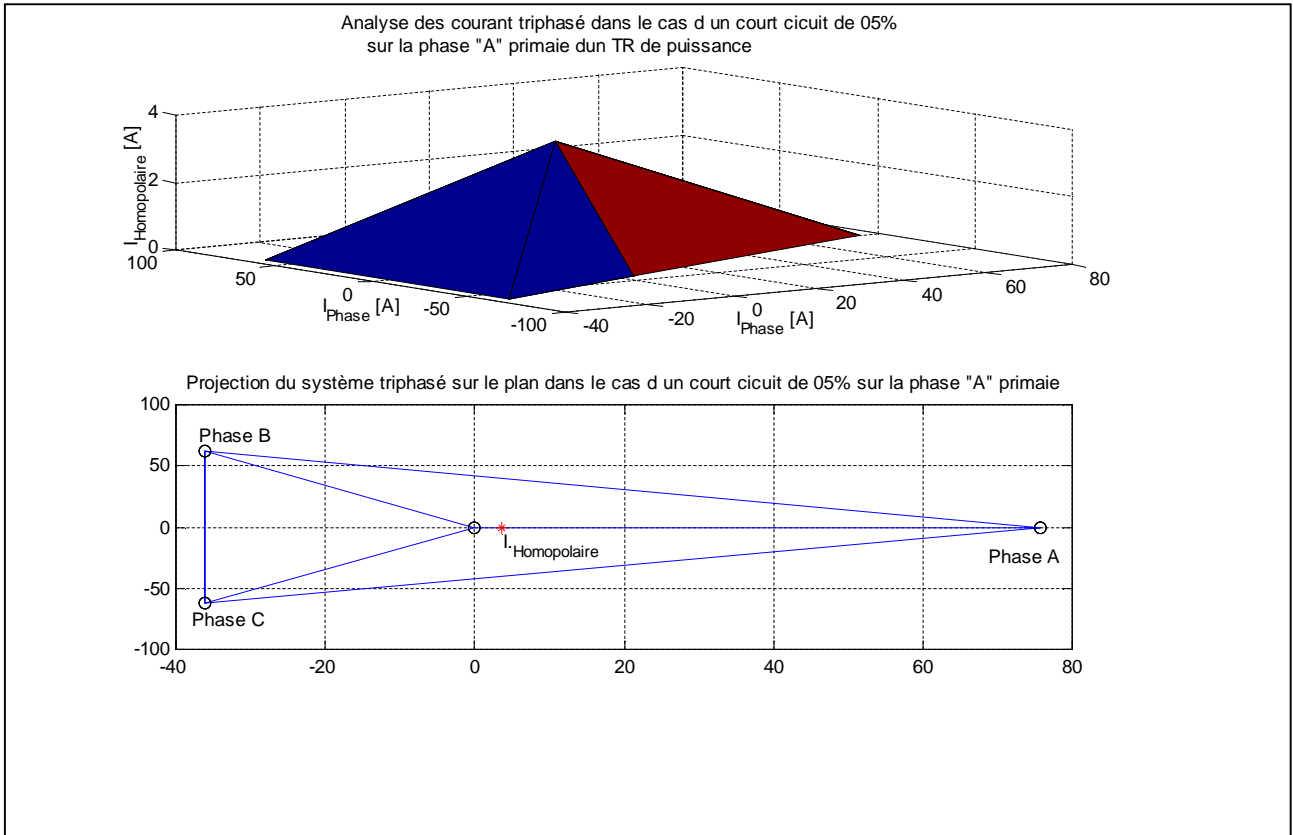
Pour l'étude et la détection de défaut de court circuit on a procédé à la conception d'un programme de simulation par le logiciel « MATLAB » pour les différentes cas possibles de ce type de défaut : voir Tableau 3.1

Différentes Cas de Simulation	Cas Sain	Cas de court circuit une seule phase				Cas de court circuit deux phases			Trois phases en court circuit	
		Légère défaut			Grand défaut					
Phase A	00%	05%	00%	00%	80%	00%	30%	00%	10%	20%
Phase B	00%	00%	05%	00%	00%	40%	70%	70%	60%	20%
Phase C	00%	00%	00%	05%	00%	40%	00%	30%	40%	20%

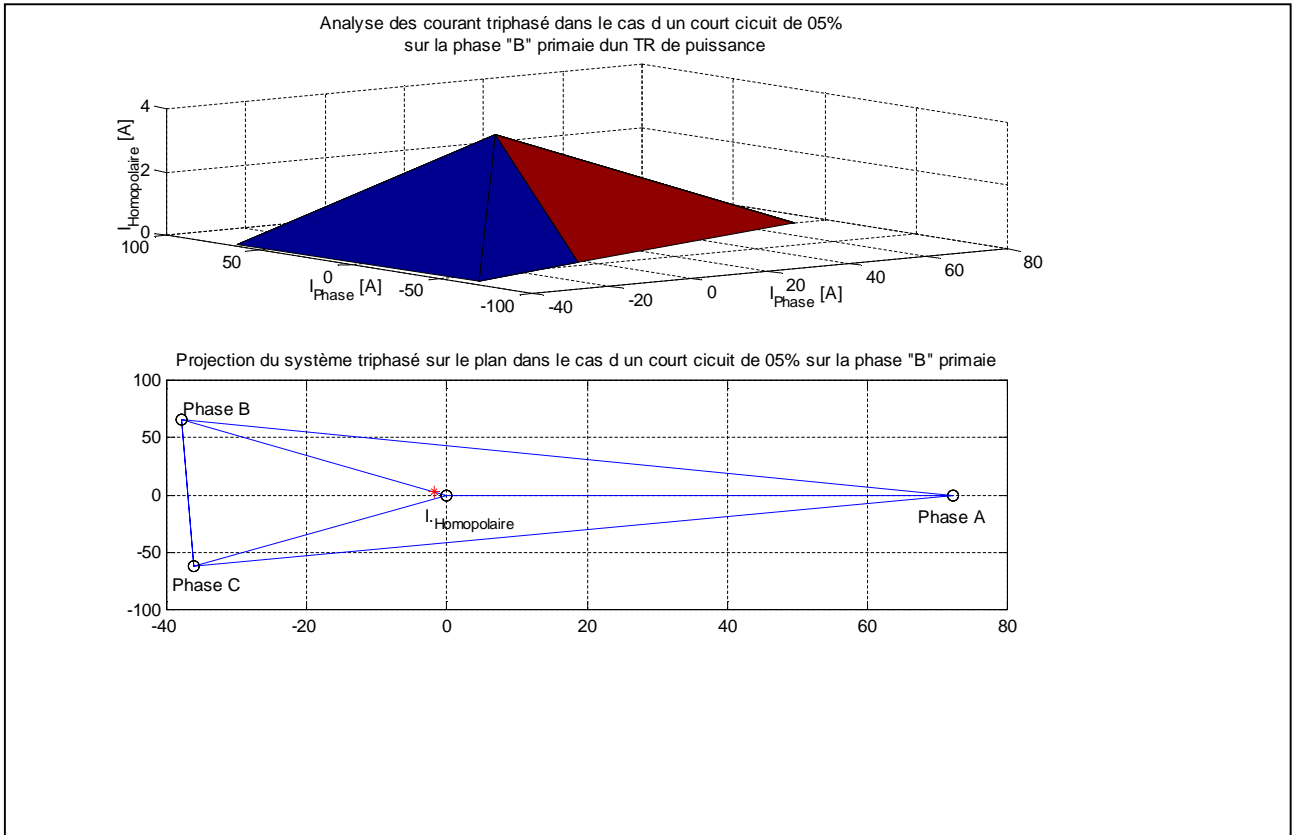
Tableau 3.1 : Différentes cas possible pour un défaut de court circuit d'un transformateur de puissance



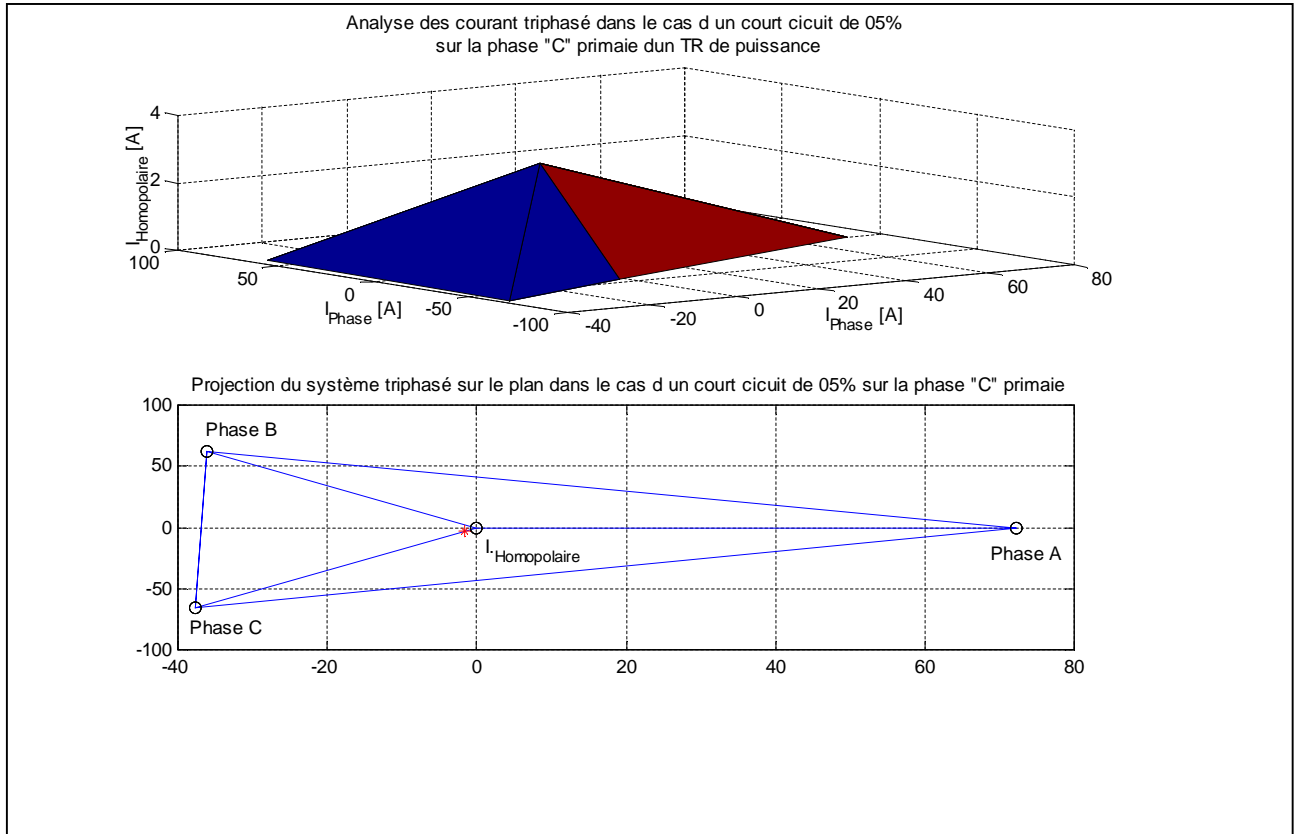
**Figure III.1- Simulation du cas sain pour un transformateur de puissance**



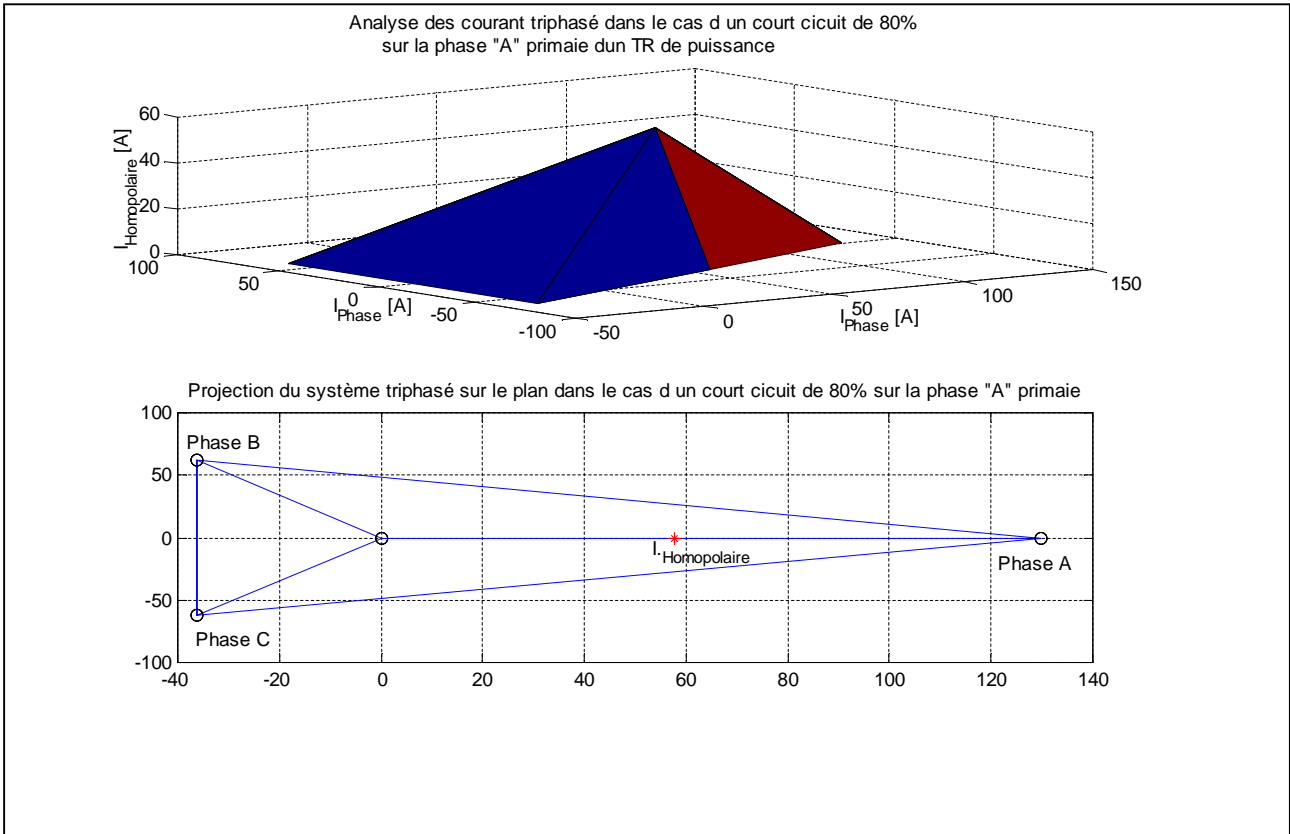
**Figure III.2- Simulation d'un court circuit de 05% de la phase .A.**



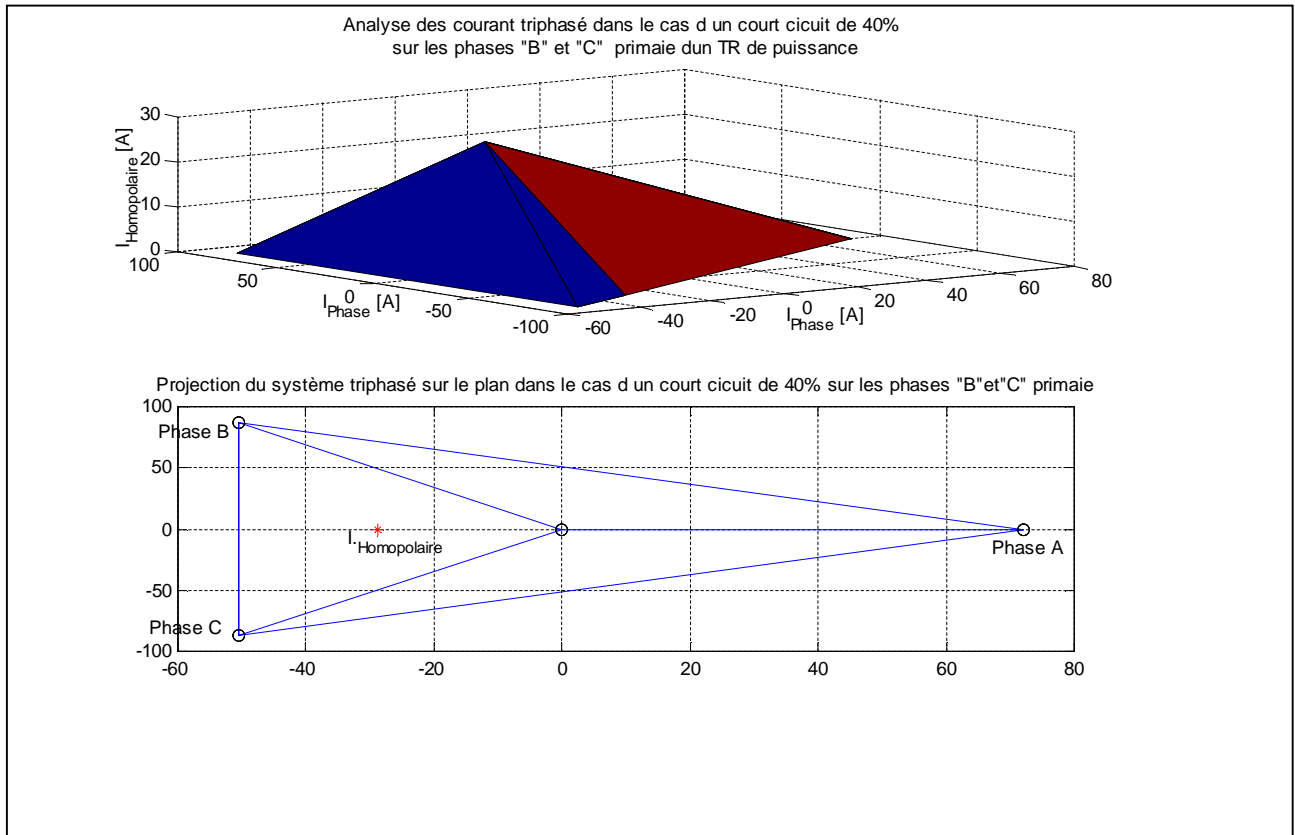
**Figure III.3- Simulation d'un court circuit de 05% de la phase .B.**



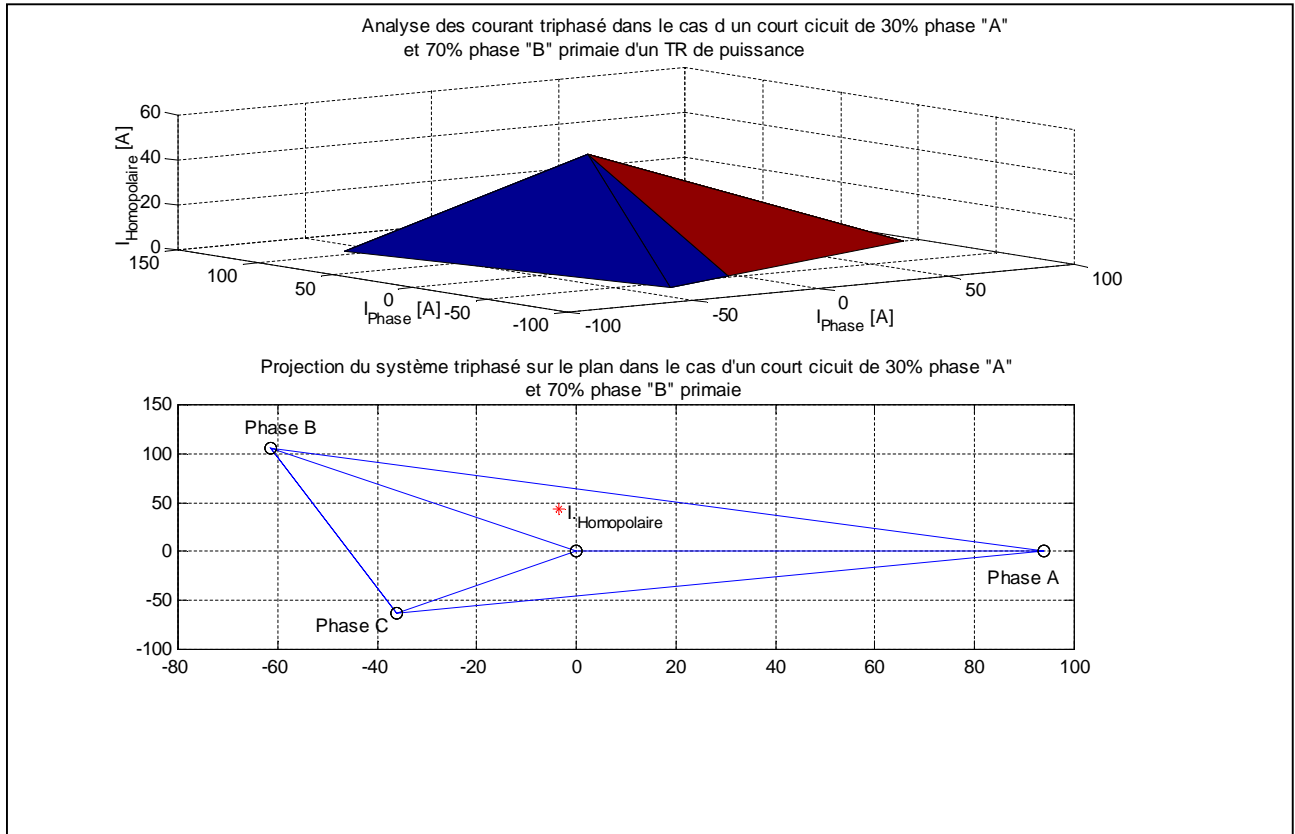
**Figure III.4- Simulation d'un court circuit de 05% de la phase .C.**



**Figure III.5- Simulation d'un court circuit de 80% de la phase .A.**

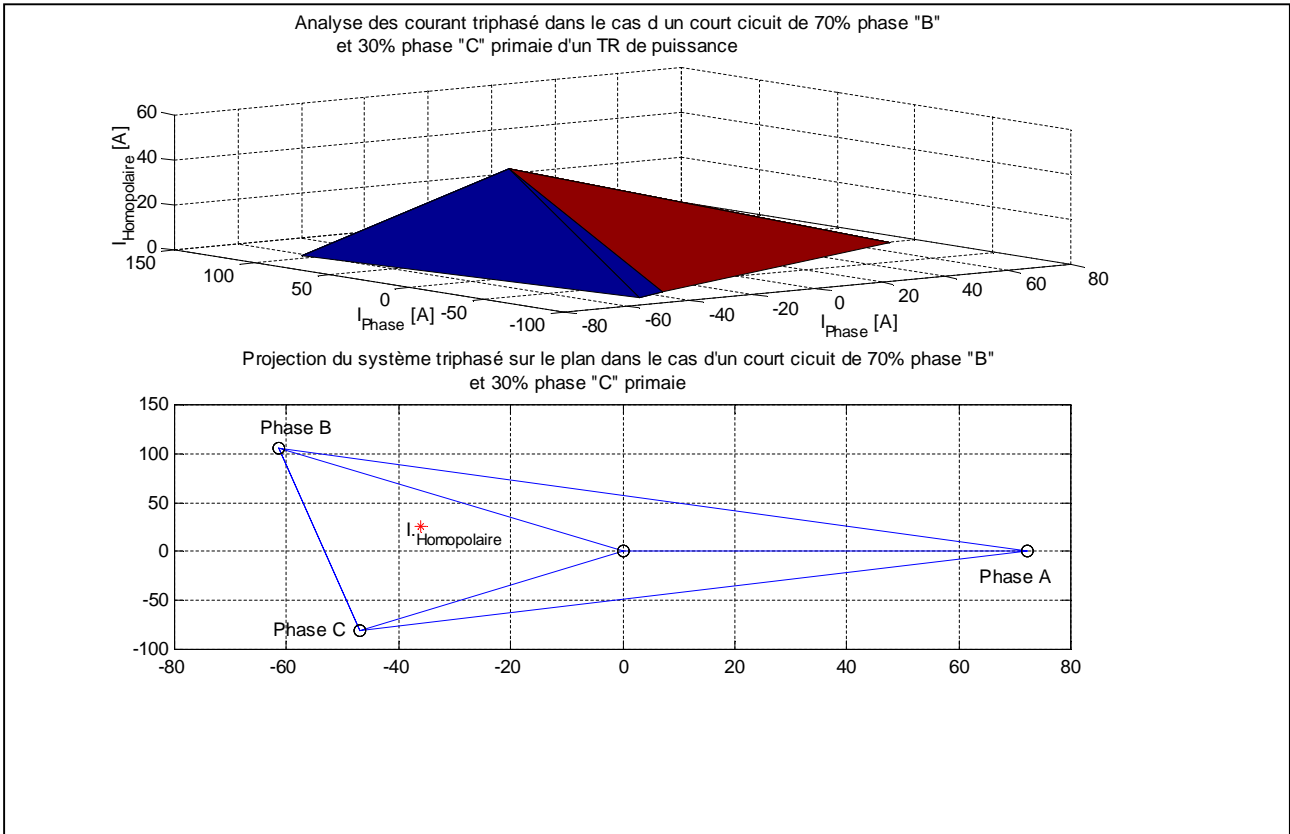


**Figure III.6- Simulation d'un court circuit de 40% des phases .B. et .C.**



**Figure III.7- Simulation d'un court circuit de 30% phase .A. et 70% phase .B.**





**Figure III.8- Simulation d'un court circuit de 70% phase .B. et 30% phase .C.**

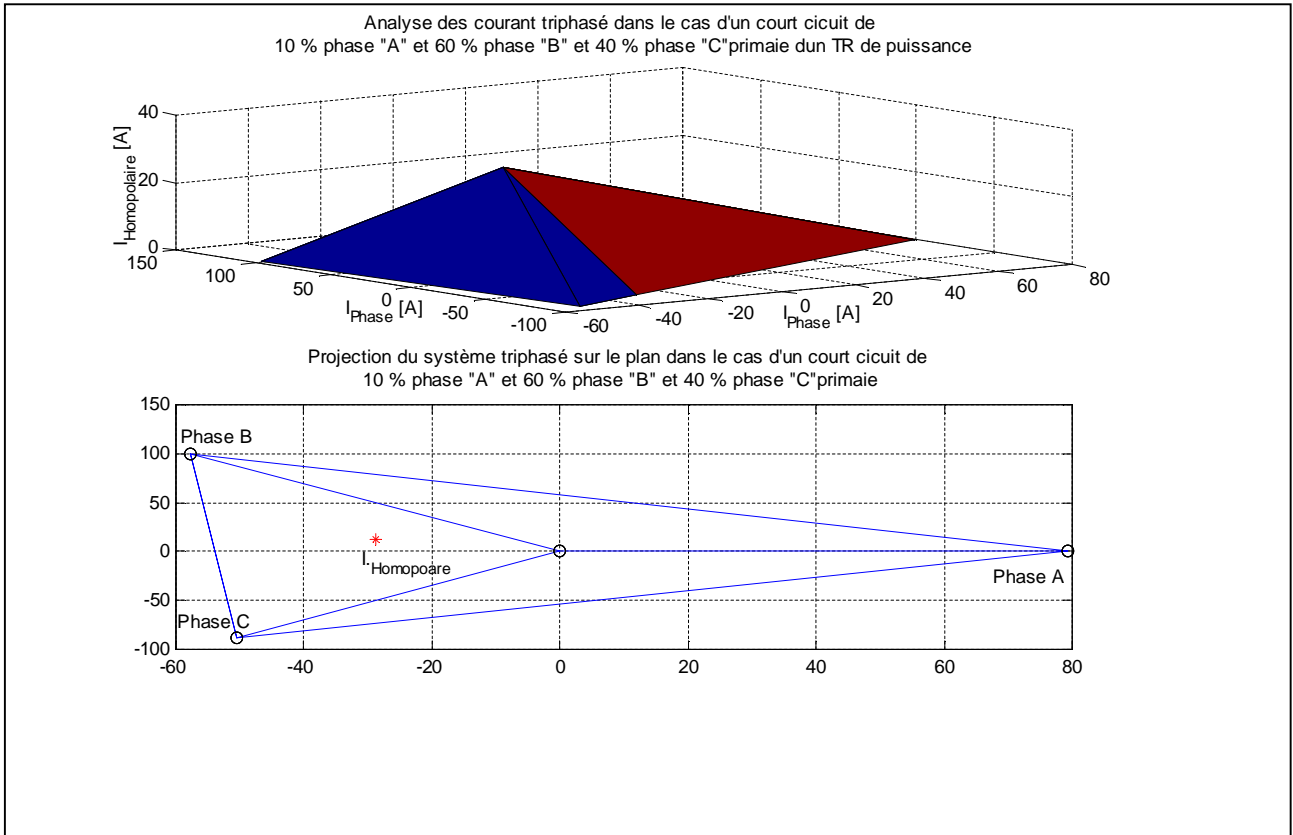
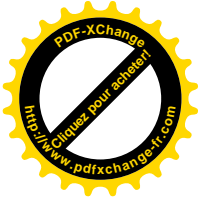
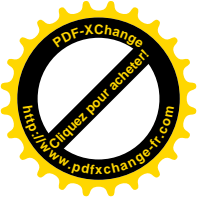


Figure III.9- Simulation d'un court circuit de 10% phase .A. , 60% phase .B. et 40% phase C.



# Bibliographie

[ 1 ] Anthony LEFEVRE « Thèse :Contribution a la Modélisation Electrique Electromagnétique et Thermique des Transformateurs ». L'université de Nantes - France 2006.

[ 2 ] Ahmad AHMAD « Thèse :Contribution a la Modélisation des Transformateurs de Puissance et leur Comportement en haute fréquence ». Doctorat \_1992 .L'Ecole Centrale de Lyon France .

[ 3 ] Kostenko et L .Piotrovski « Machines Electriques » Edition.Mir. Moscou.

[ 4 ] SCHFFER «Thèse :Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés a la simulation et à la détection de défauts». Doctorat \_1999.universite de Nante France.

[ 5 ] Alain SCHENK « Thèse :Surveillance Continue des Transformateur de puissance par Réseaux Neurones Auto-Organisés » Lausanne, EPFL 2001.

[ 6 ] Revues ABB «

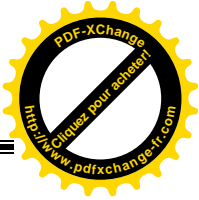
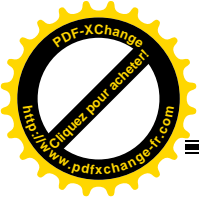
- Transformateurs de distribution de petite puissance ( $\leq 250$  kVA)
- Transformateurs de distribution de moyenne puissance ( $> 250$  kVA,  $\leq 2000$  kVA) ;
- Transformateurs de distribution de forte puissance ( $> 2000$  kVA, jusqu'à 72,5kV) ;

[7 ] Smail BACHIR «Thèse :Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone par l'Estimation paramétrique» Editions ,Mars 1992

[8 ] R.Ghemke « Dépannage des Machines électriques» Editions ,1981.0

[ 9 ] A.S. KOKOREV «Gide de bobineur»Ecole supérieur , Moscou, 1979.

[ 10] SONELGAZ «Documentations propre a l'entreprise ».



## Conclusion générale

Une des phases les plus significatives dans l'identification des défauts dans un appareil quelconque est la méthode de modélisation adopter.

L'élément que nous avons étudié et le transformateur de puissance, vue son importance dans le domaine du marché électro-énergétique avant d'entamer notre étude, nous avons décrit d'une manière non exhaustive tous les éléments constituant le transformateur de puissance afin de situer l'importance de chaque élément. La modélisation que nous avons adopté est la M2C car à notre sens elle se rapproche le plus fidèlement au phénomène physique.

Conformément à la modélisation par la M2C nous avons pu mettre des indices qui peuvent nous orienter dans l'identification des défauts : nature, degré et localisation.

En perspective on peut fixer les points suivants :

- Modélisation des défauts dues aux contacts
- Modélisation des défauts dues au déclassement de la qualité d'huile
- Modélisation généraliser afin de mettre un moyen de diagnostic efficace et précis pour éviter les contraintes technico-économiques des pannes intempestives.
- Programmer des essais pratiques et réels sur des transformateurs de puissance en collaboration avec l'entreprise national d'électricité et du gaz ( La SONELGAZ ) pour posé une méthodologie expérimentale qui peut minimiser le nombre des panes et les avaries des transformateurs de puissance.