

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة أكلي محند أولحاج البويرة

UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ — BOUIRA  
UAMO (ALGERIE)



Faculté des sciences et sciences appliquées.

## Mémoire de Master

Présenté au département de Génie Electrique.

Pour obtenir le diplôme

## De Master En Electrotechnique

Option :

**Ingénierie de l'Energie Electrique et Transport (IEET)**

Par :

**BOUALI TAYEB**

**ARAR CHEMS EDDINE**

Thème

## ***Contribution à la modélisation des transformateurs de puissance pour des études des phénomènes transitoires***

*Soutenu le 28/06/2016 devant la commission d'examen composée de :*

Mlle. YASSA	Université Akli Mohand Oulhadj Bouira	Président
Mr. YAHIOU	Université Akli Mohand Oulhadj Bouira	Rapporteur
Mr. BERRAG	Université Akli Mohand Oulhadj Bouira	Examineur
Mr. CHALABI	Université Akli Mohand Oulhadj Bouira	Examineur

2015/2016

*Je dédie ce travail à :*  
*Ma mère,*  
*Mon père,*  
*Mes frères et mes sœurs,*  
*Tous mes amis sans exception.*  
*Bouali*

*Je dédie ce travail à :*  
*Ma mère,*  
*Mon père,*  
*Mes frères et mes sœurs,*  
*Tous mes amis sans exception,*  
*Arar*

# REMERCIEMENTS

---

Nous remercions Dieu tout puissant clément et miséricordieux de m'avoir soigné et aidé.

Nous tenons, avant tout, à exprimer nos profondes gratitude à monsieur YAHIOU Abdelghani, qui a assumé la direction de ce travail. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de nos reconnaissances pour son dévouement, sa patience sa disponibilité, ses conseils et son aide constant qu'il nous apportés tout au long de ce travail.

Nous remercions vivement au président et membres du jury pour avoir bien vouloir accepter de faire partie du jury de soutenance et leurs présences pour examiner ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de nos gratitude respect.

Nous adressons nos vifs remerciements à tous les enseignants du l'université UAMO Bouira qui ont contribués à nos formations durant toutes nos études.

Nous tenons également à remercier tous nos collègues des études pour leurs soutiens et leur motivation. Que tous nos amis sans exception, ils sont nombreux, nous ne pouvons tous les citer mais nous ne les oublions.

Enfin, que toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, soient chaleureusement remerciée.

# SOMMAIRE

---

<u>DEDICACES</u> .....	02
<u>REMERCIEMENTS</u> .....	03
<u>SOMMAIRE</u> .....	04
<u>Liste des figures</u> .....	07
<u>Liste des tableaux</u> .....	10
<u>Listes des acronymes et symboles</u> .....	11
<u>INTRODUCTION GENERALE</u> .....	13
<b><u>Chapitre 01</u></b> .....	<b>15</b>
<u>CONSIDERATIONS FONDAMENTALES SUR LES TRANSFORMATEUR</u> .....	15
1.1. Introduction.....	15
1.2. Principaux éléments des transformateurs.....	15
1.3. Circuit Magnétique.....	15
1.3.1. Champs magnétique et induction magnétique.....	16
1.3.2. Force magnétomotrice F.m.m .....	16
1.4. Relation d'Hopkinson.....	17
1.5. Loi de Faraday.....	17
1.6. Loi de Lenz.....	18
1.7. Transformateur .....	19
1.7.1. Rôle.....	19
1.7.2. Symbole.....	19
1.7.3. Constitution.....	19
1.7.4. Principe de fonctionnement.....	20
1.8. Différents types de transformateurs.....	20
1.8.1. Transformateur de puissance.....	20
1.8.2. Transformateur à colonnes.....	20
1.8.3. Transformateur cuirassé.....	21
1.8.4. Transformateur immergé dans l'huile et transformateur sec.....	22
1.8.4.1. Transformateur à l'huile.....	22
1.8.4.2. Transformateur sec.....	22
1.8.5. Transformateur de contrôle.....	22
1.8.6. Transformateur d'isolement.....	23
1.8.7. Transformateur de potentiel.....	23
1.8.8. Transformateur de distribution.....	23
1.8.9. Transformateur de mesure.....	23
1.8.10. Transformateur déphaseur.....	23
1.8.11. Transformateur d'essai.....	24
1.8.12. Autotransformateur.....	24
1.9. Transformateur triphasé.....	24
1.9.1. Constitution du transformateur triphasé.....	25

1.9.2. Mode de connexion .....	26
1.9.2.1. Connexion étoile .....	26
1.9.2.2. Connexion triangle .....	26
1.9.2.3. Connexion Zigzag .....	26
1.10. Contraintes .....	27
1.10.1. Surtension.....	27
1.10.2. Court-circuit .....	27
1.10.3. Surcharges.....	27
1.11. Régimes de fonctionnement du transformateur.....	28
1.11.1. Régime de surcharge.....	28
1.11.2. Régime déséquilibré .....	28
1.11.3. Régime transitoire .....	28
1.12. Conclusion.....	28
<b><u>Chapitre 02</u></b> .....	<b>29</b>
<b><u>Modélisation des transformateurs</u></b> .....	<b>29</b>
2.1. Introduction .....	29
2.2. Les modèles usuels du transformateur .....	29
2.2.1. Modèle RESEL .....	29
2.2.2. Modèle EMTP .....	30
2.2.3. Modèle L'ATP .....	31
2.3. Modélisation des transformateurs .....	31
2.3.1. Transformateur monophasé linéaire sans saturation .....	31
2.3.2. Transformateur monophasé avec saturation .....	32
2.3.3. Transformateur monophasé avec saturation et perte fer .....	33
2.4. Modèles électromagnétiques .....	33
2.4.1. Equations électromagnétiques .....	33
2.4.1.1. Equations de Maxwell .....	34
2.4.1.2. Equation de Maxwell simplifiés .....	34
2.4.1.3. La loi d'Ohm .....	35
2.4.1.4. Relations constitutives des matériaux .....	35
2.4.1.5. Conditions de passage .....	35
2.4.1.6. Conditions aux limites spatiales et temporelles .....	36
2.5. La méthode des éléments finis .....	36
2.5.1. Formulation électromagnétique .....	37
2.5.1.1. Formulation en potentiel scalaire magnétique total .....	37
2.5.1.2. Formulation en potentiel scalaire magnétique réduit .....	37
2.6. Phénomènes d'enclenchement du transformateur de puissance .....	38
2.6.1. Courant d'appel du transformateur .....	38
2.6.2. Effets du courant d'appel .....	39
2.6.3. Champ magnétique rémanent .....	39
2.6.4. Courant d'appel en fonction de Flux rémanent .....	40
2.7. Conclusion .....	42
<b><u>Chapitre 03</u></b> .....	<b>43</b>
<b><u>simulation du courant d'appel</u></b> .....	<b>43</b>
3.1. Introduction .....	43

3.2. Objet d'essai (Application sur les transformateurs) .....	43
3.3. Simulation de courant d'appel utilisant le MATLAB .....	43
3.3.1. Simulation .....	44
3.4. Partie A : courant d'appel dans le cas d'un transformateur monophasé. ....	46
3.4.1. Fonctionnement en régime permanent. ....	46
3.4.2. Régime transitoire .....	47
3.4.2.1. Simulation de saturation avec hystérésis .....	48
3.4.2.2. Modélisation du cycle d'hystérésis .....	49
3.4.2.3. Pertes par courants de Foucault .....	49
3.4.2.4. Pertes par hystérésis .....	50
3.4.2.5. Influence de la résistance série.....	51
3.4.2.6. Influence de moment de la fermeture du disjoncteur .....	53
3.5. Partie B : courant d'appel dans le cas d'un transformateur triphasé .....	56
3.5.1. Régime permanent .....	56
3.5.2. Régime transitoire .....	58
3.5.2.1. Proportion de courant d'appel .....	58
3.5.2.2. Influence de la résistance en série .....	59
3.5.2.3. Variation de flux rémanent .....	63
3.6. Conclusion .....	67
<b><u>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES</u></b> .....	<b>68</b>
<b><u>REFERENCES</u></b> .....	<b>69</b>

# LISTE DES FIGURES

---

<b>Figure1.1.</b> <i>Circuit Magnétique D'un Transformateur</i> .....	16
<b>Figure1.2.</b> <i>Portion du circuit</i> .....	17
<b>Figure 1.3.</b> <i>Schéma explicatif de la Loi de Faraday</i> .....	18
<b>Figure1.4.</b> <i>Rôle du transformateur</i> .....	19
<b>Figure1.5.</b> <i>Symbole du transformateur</i> .....	19
<b>Figure1.6.</b> <i>Transformateur à colonnes</i> .....	21
<b>Figure 1.7.</b> <i>Transformateur cuirassé</i> .....	21
<b>Figure 1.8.</b> <i>Trois transformateurs monophasés identiques</i> .....	24
<b>Figure1.9.</b> <i>Transformateur triphasé</i> .....	25
<b>Figure1.10.</b> <i>Disposition des enroulements autour du noyau</i> .....	25
<b>Figure1.11.</b> <i>Types de connexion</i> .....	26
<b>Figure 2.1.</b> <i>Circuit de base de transformateur saturable</i> .....	30
<b>Figure 2.2.</b> <i>Modèle sans saturation</i> .....	31
<b>Figure 2.3.</b> <i>Modèle avec pertes fer, sans saturation.</i> .....	31
<b>Figure 2.4.</b> <i>Modèle avec saturation</i> .....	33
<b>Figure 2.5.</b> <i>Modèle avec pertes fer, avec saturation</i> .....	33
<b>Figure 2.6.</b> <i>Interface deux milieux</i> .....	35
<b>Figure 2.7.</b> <i>Cycle d'hystérésis</i> .....	40
<b>Figure 2.8.</b> <i>Caractéristiques flux, courant magnétisant Régime permanent <math>\lambda &lt; \lambda_s</math>, (b) Régime transitoire <math>\lambda &gt; \lambda_s</math></i> .....	40
<b>Figure 2.9.</b> <i>Deux régimes sur la courbe de saturation</i> .....	41
<b>Figure 3.1.</b> <i>Interface graphique de mesure (Matlab)</i> .....	44
<b>Figure 3.2.</b> <i>Courbe de saturation de transformateur monophasé (a) triphasé</i> .....	45
<b>Figure 3.3.</b> <i>Circuit de la simulation en régime permanent</i> .....	46
<b>Figure 3.4.</b> <i>Simulation du courant magnétisante en régime permanent de transformateur monophasé</i> .....	46
<b>Figure 3.5.</b> <i>Simulation du flux.</i> .....	47
<b>Figure 3.6.</b> <i>Simulation du courant d'appel en régime transitoire</i> .....	48
<b>Figure 3.7.</b> <i>Simulation de tension primaire, secondaire</i> .....	48
<b>Figure 3.8.</b> <i>Interface block paramètres du transformateur</i> .....	49

<b>Figure 3.9.</b> <i>Pertes par courant de Foucault</i> .....	50
<b>Figure 3.10.</b> <i>Pertes par hystérésis</i> .....	50
<b>Figure 3.11.</b> <i>Circuit de la simulation avec résistance en série</i> .....	51
<b>Figure 3.12.</b> <i>Simulations du flux dans le cas ou <math>R = 100\Omega</math></i> .....	51
<b>Figure 3.13.</b> <i>Simulations de courant d'appel dans le cas ou <math>R = 100\Omega</math></i> .....	51
<b>Figure 3.14.</b> <i>Simulations de tension dans le cas ou <math>R = 100\Omega</math></i> .....	52
<b>Figure 3.15.</b> <i>Simulations du flux dans le cas ou <math>R_s=35000 \Omega</math></i> .....	52
<b>Figure 3.16.</b> <i>Simulations de courant d'appel dans le cas ou <math>R_s=35000 \Omega</math></i> .....	52
<b>Figure 3.17.</b> <i>Simulations de tension primaire, secondaire dans le cas ou <math>R_s=35000 \Omega</math></i> .....	53
<b>Figure 3.18.</b> <i>Circuit de la simulation de moment de la fermeture du disjoncteur</i> .....	54
<b>Figure 3.19.</b> <i>Interface block paramètres du Breaker</i> .....	54
<b>Figure 3.20.</b> <i>Simulation de courant d'appel pour Temps de fermeture du disjoncteur [0.10.13]</i> .....	54
<b>Figure 3.21.</b> <i>Simulation de courant d'appel pour Temps de fermeture du disjoncteur [0.10.15]</i> .....	55
<b>Figure 3.22.</b> <i>Simulation de courant d'appel pour Temps de fermeture du disjoncteur [0.10.17]</i> .....	55
<b>Figure 3.23.</b> <i>Simulation de courant d'appel pour Temps de fermeture du disjoncteur [0.1 0.18]</i> .....	55
<b>Figure 3.24.</b> <i>Circuit de la simulation (régime permanent)</i> .....	56
<b>Figure 3.25.</b> <i>Courant magnétisant du transformateur triphasé : (a) durant 20 s (b) Zoom</i> .....	57
<b>Figure 3.26.</b> <i>Courant magnétisant d'appel</i> .....	58
<b>Figure 3.27.</b> <i>Tension du phase A</i> .....	58
<b>Figure 3.28.</b> <i>Flux du phase A</i> .....	59
<b>Figure 3.29.</b> <i>Flux des phases A, B et C</i> .....	59
<b>Figure 3.30.</b> <i>Circuit de la simulation</i> .....	59
<b>Figure 3.31.</b> <i>Courant magnétisant d'appel</i> .....	60

<b>Figure 3.32.</b> <i>Tension du phaseA</i> .....	61
<b>Figure3.33.</b> <i>Flux du phase A</i> .....	61
<b>Figure 3.34.</b> <i>Flux des phases A, B et C</i> .....	61
<b>Figure 3.35.</b> <i>Courant magnétisant d'appel</i> .....	62
<b>Figure 3.36.</b> <i>Tension du phase A</i> .....	62
<b>Figure 3.37.</b> <i>Flux du phase A</i> .....	62
<b>Figure 3.38.</b> <i>Flux des phases A, B et C</i> .....	63
<b>Figure 3.39.</b> <i>Circuit de la simulation</i> .....	64
<b>Figure 3.40.</b> <i>Bloc paramètre de transformateur</i> .....	64
<b>Figure 3.41.</b> <i>Courant magnétisant d'appel</i> .....	65
<b>Figure 3.42.</b> <i>Tension de phase A</i> .....	65
<b>Figure 3.44.</b> <i>Flux des phases A, B et C</i> .....	65
<b>Figure 3.45.</b> <i>Courant magnétisant d'appel</i> .....	66
<b>Figure 3.46.</b> <i>Tension de phase A</i> .....	66
<b>Figure 3.47.</b> <i>Flux de phase A</i> .....	66
<b>Figure 3.48.</b> <i>Flux des phases A, B et C</i> .....	67

# LISTE DES TABLEAUX

---

<b>Tableau 1.1.</b> <i>Grandeurs du circuit magnétique.....</i>	<i>16</i>
<b>Tableau 1.2.</b> <i>Analogie entre circuits électriques et magnétiques.....</i>	<i>18</i>
<b>Tableau 3.1.</b> <i>Les paramètres pour les deux transformateurs.....</i>	<i>45</i>
<b>Tableau 3.2.</b> <i>Caractéristique de la saturation de transformateur monophasé et triphasé.....</i>	<i>45</i>
<b>Tableau 3.3.</b> <i>Résultats de mesure.....</i>	<i>47</i>
<b>Tableau 3.4.</b> <i>Montre les valeurs de la première crête pour chaque résistance insérée.....</i>	<i>53</i>
<b>Tableau 3.5.</b> <i>Montre les valeurs de la première crête pour chaque temps de fermeture disjoncteur.....</i>	<i>56</i>
<b>Tableau 3.6.</b> <i>Courant d'appel des trois phases.....</i>	<i>58</i>
<b>Tableau 3.7.</b> <i>Courant d'appel des trois phases en fonction de la valeur de la Résistance Série.....</i>	<i>60</i>
<b>Tableau 3.8.</b> <i>Caractéristique du saturation de transformateur triphasé.....</i>	<i>64</i>

# LISTES DES ACRONYMES ET SYMBOLES

---

<i>EMTP</i> :	Electromagnetic Transient Program
<i>ATP</i> :	Alternative Transient Program
$\mathfrak{F}$ :	Force magnétomotrice
<i>H</i> :	Intensité de champ magnétique
<i>B</i> :	Densité de champ magnétique
$\mu$ :	Perméabilité
$\phi$ :	Flux élémentaire
$\lambda$ :	Flux de liaison
$\lambda_0$	Flux de liaison initial
$\lambda_s$	Flux de liaison sature
<i>L</i> :	Inductance
$\mathfrak{R}$ :	Reluctance
$\Lambda$ :	Perméance
$\mu_0$ :	Perméabilité de l'air
<i>n</i> :	Nombre de spires
<i>A</i> :	Section de noyau (surface
$n_1$ :	Nombre de spire primaire
$n_2$ :	Nombre de spire secondaire
<i>m</i> :	Rapport de transformation
$\omega$ :	Pulsation angulaire
<i>l</i> :	Longueur du noyau
<i>f</i> :	Fréquence
$Z_L$ :	Impédance inductive
$Z_C$	Impédance capacitive
<i>V, v</i> :	Tension
<i>I, i</i> :	Courant
<i>E</i> :	Intensité de champ électrique
<i>D</i> :	Densité de champ électrique
<i>R</i> :	Résistance
$\sigma$ :	Conductivité
<i>t</i> :	Temps
<i>S</i> :	Puissance apparente
<i>T</i> :	Période
<i>N</i> :	Nombre des segments
$\phi_r$ :	potentiel scalaire magnétique "réduit"
$\mu_r$ :	Perméabilités relative

$H_0$	Champ de source
$H_r$	Champ réduit
$\Phi_t$	Flux total
$s_0$	puissance apparente émise par la source
$Se$	puissance induite
$PJ$	dissipée par effet Joule
$Qf$	puissance réactive stockée dans le volume
$U$	valeur d'un champ
$N$	la normale unitaire à l'interface orientée du milieu
$U1$	grandeurs
$U2$	Grandeurs
$\epsilon$	permittivité électrique
$B_r$	l'induction rémanente
$J_0$	la densité de courant source
$J_c$	Densité de courant source
$J_c$	Densité de courant de conduction
$\rho$	Densité de charge volumique
$Qi$	charge contenue dans le volume
$Ds$	Elément de surface
$dV$	Elément de volume
$dl$	Elément de longueur
$J$	densités de charges électriques libres
$R_m$	résistance non linéaire
$R_1$	Résistance de l'enroulement primaire
$L_1$	inductance de l'enroulement primaire
$R_2$	Résistance de l'enroulement secondaire
$L_2$	Inductance de l'enroulement secondaire
$L_m$	Inductance de magnétisation du circuit magnétique
$R_m$	Résistance qui représente les pertes fer dans le circuit magnétique

# INTRODUCTION GENERALE

---

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité. Il doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production, transport, consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble. Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs qu'ils constituent l'une des plus importantes parties du système de puissance dans sa partie de transport ou de distribution. Le mémoire s'inscrit dans le cadre de l'étude des effets de saturation des transformateurs de puissance.

L'objectif de ce travail est d'étudier en particulier les modèles de transformateurs de puissance et simulé un modèle dynamique de noyau approprié aux études transitoire.

L'accent est mis sur la région des basses fréquences où la saturation est un déficit. Ces modèles peuvent être utilisés dans des simulations transitoires pour prédire les transitoires de commutation et les courants d'appel.

Pour présenter nos travaux, nous avons articulé ce document en trois chapitres ;

Dans le premier chapitre, nous présentons d'abord les Principaux éléments des transformateurs, pour modéliser et pour étudier les différents types des transformateurs de puissance. Cette partie a pour but de déduire le rôle de transformateur et leur utilisation est primordiale pour le transport d'énergie électrique.

Nous présentons, dans le deuxième chapitre, les modèles usuels du transformateur, des pertes par courants de Foucault dans les noyaux, les modèles électromagnétique, modélisation des transformateurs monophasé linéaire sans saturation et avec saturation, et la différente formulation électromagnétique.

Enfin, le dernier chapitre nous représentons par une description de schéma bloc utilisé, dans le logiciel existant de simulation de régime transitoire dans les transformateurs de puissance. Nous comparons les résultats (courant d'appel, flux, tension, ...) donnés par le logiciel,

avant et après les modifications, pour une maquette de transformateur. Nous concluons sur l'influence de cette simulation sur le régime transitoire dans les transformateurs de puissance.

---

# CHAPITRE 01

---

## GENERALITE SUR LES TRANSFORMATEURS

---

### 1.1. Introduction

Le réseau électrique est constitué de plusieurs équipements pour assurer une bonne transmission de l'énergie vers différents consommateurs. Parmi ces équipements, on trouve le transformateur. Les transformateurs sont des machines statiques à induction électromagnétique généralement utilisés pour modifier les caractéristiques de l'énergie électrique alternative afin de la rendre aussi commodes que possible à tous les stades, de la production, du transport de la distribution et de l'utilisation. Cet appareil est d'un emploi absolument universel, en effet il transforme les signaux des sources de tensions et de courants sinusoïdaux en signaux de même fréquence mais de valeurs efficaces généralement différentes.

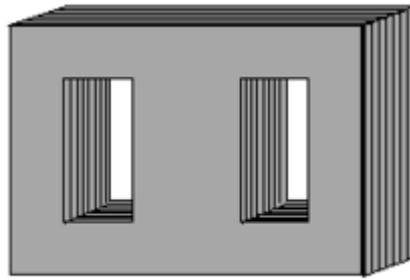
Ce chapitre est consacré à une présentation générale d'un transformateur de puissance. On donne quelques notions de base sur le magnétisme, le principe, la construction, les types, les contraintes et les régimes de fonctionnement.

### 1.2. Principaux éléments des transformateurs

D'une manière générale, un transformateur est constitué d'un circuit magnétique feuilleté et d'un ensemble des bobines séparées par des écrans électrostatiques qui entourent des noyaux magnétiques. Chaque bobine formant le milieu conducteur est organisée en paquets de spires et chaque spire étant constituée de brins élémentaires. Les différents types de transformateurs se distinguent suivant la disposition géométrique de leurs constituants et la forme de leur circuit magnétique et du type de refroidissement. [1]

### 1.3. Circuit Magnétique

Un circuit magnétique est le volume où se referment toutes les lignes de force (F.m.m) d'un champ magnétique. Dans tous les domaines où on aura à utiliser des phénomènes magnétiques (par exemple : machines, appareils de mesure), on sera amené à canaliser les lignes de force dans un circuit bon conducteur du flux magnétique. Ce circuit sera constitué par des matériaux dits ferromagnétiques et en particulier par du fer.



**Figure 1.1. :** Circuit Magnétique D'un Transformateur

On obtient un champ magnétique grâce à des aimants permanents ou bien des circuits électriques parcourus par des courants.

### 1.3.1. Champs magnétique et induction magnétique

Lorsqu'un champ magnétique  $\mathbf{H}$  circule dans un matériau ferromagnétique, il se crée, dans le matériau, une induction magnétique  $\mathbf{B}$ , dont la variation suit la relation :

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1)$$

Avec  $\mathbf{B}$  : induction magnétique en Tesla,  $\mathbf{H}$  : Champ magnétique en (A/m) et  $\mu$  : la perméabilité magnétique du matériau. On définit la perméabilité relative comme suit :

$$\mu_r = \mu / \mu_0 \quad (2)$$

Avec  $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$  : perméabilité de vide [H/m].

### 1.3.2. Force magnétomotrice F.m.m

La force magnétomotrice est la cause qui engendre le flux magnétique. Elle est égale à  $n I$ , avec  $n$  est le nombre de spires et  $I$  est le courant traversant les spires.

**Tableau 1.1.** Grandeurs du circuit magnétique

Nom	symbole	Equation
Force magnétomotrice (Fmm)	$\mathfrak{F}$ [A-t]	$\mathfrak{F} = nI$
Intensité de champ magnétique	$H$ [A-t/m]	$H = nI/l$
Densité de champ magnétique	$B$ [T] [Wb/m <sup>2</sup> ]	$B = \mu H$
Perméabilité	$\mu$ [Wb/A. m]	$\mu = \mu_0 \mu_r$
Flux	$\phi$ [Wb]	$\phi = BA$
Flux de liaison	$\lambda$ [Wb-t] [V.s]	$\lambda = n\phi$
Inductance	$L$ [H]	$L = \lambda/I = n^2/\mathfrak{R} = n^2 \Lambda$
Reluctance	$\mathfrak{R}$ [A. t/ Wb] [H <sup>-1</sup> ]	$\mathfrak{R} = 1/\Lambda$
Perméance	$\Lambda$ [H]	$\Lambda = \mu_0 \mu_r A/l$

$l$  : Longueur du noyau.  $n$  : Nombre de spires.  $A$  : Section de noyau.

### 1.4. Relation d'Hopkinson

Pour une portion de circuit de longueur  $l$  et de section droite  $S$ , représenté dans la figure (1.2)

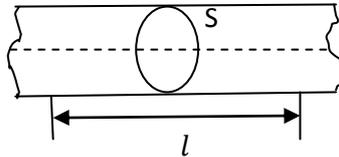


Figure 1.2. Portion du circuit

Théorème d'Ampère permet de décrire

$$H l = \mathfrak{F} \quad (3)$$

Avec

$$H = \frac{\phi}{A \mu} \quad (4)$$

On obtient

$$\mathfrak{F} = l \frac{\phi}{A \mu} \quad (5)$$

Le terme  $\frac{l}{A \mu}$  est appelée réluctance on la note  $\mathfrak{R}$  et elle est exprimée en  $H^{-1}$  d'où la relation d'Hopkinson :

$$\mathfrak{R} \phi = \mathfrak{F} \quad (6)$$

### 1.5. Loi de Faraday

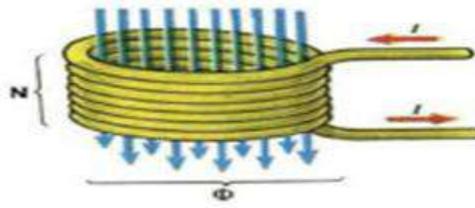
La loi de Faraday énonce que la force électromotrice induite dans un circuit fermé baigné par un champ magnétique est directement proportionnelle à la variation dans le temps du flux du champ magnétique pénétrant dans le circuit

$$e(t) = -n \frac{d\phi}{dt} \quad (7)$$

Avec  $n$  : Nombre de spires

$\phi(t)$ : Flux qui traverse les  $n$  spires.

Le signe négatif détermine le sens du courant induit dans le circuit.



**Figure 1.3.** Schéma explicatif de la Loi de Faraday

### 1.6. Loi de Lenz :

Un courant sinusoïdal dans  $n$  spires bobinées sur un matériau magnétique fermé crée un flux magnétique sinusoïdal. Dans ce cas on a :

$$\phi(t) = n i(t)/\mathfrak{R} \quad (8)$$

Une variation de flux magnétique dans une spire provoque l'apparition d'une tension (f.e.m) créant un courant dont les effets s'opposent au flux. C'est la loi de Lenz :

$$u(t) = -n \frac{d\phi}{dt} \quad (9)$$

Donc :

$$u(t) = \frac{n^2}{\mathfrak{R}} \frac{di(t)}{dt} = L \frac{di(t)}{dt} \quad (10)$$

$L$  : Inductance de la bobine

**Tableau 1.2.** Analogie entre circuits électriques et magnétiques

Intensité de champ électrique $\mathbf{E}$ , (V/m)	Intensité de champ magnétique $\mathbf{H}$ , (A.tours/m)
Tension $\mathbf{V}$ , (V)	Force magnétomotrice $n\mathbf{I}$ , (A.t)
Courant $\mathbf{I}$ , (A)	Flux magnétique $\phi$ , (Wb)
Densité de champ électrique $\mathbf{D}$ , (V/m <sup>2</sup> )	Densité de champ magnétique $\mathbf{B}$ , (Wb/m <sup>2</sup> )
Resistance $\mathbf{R}$ , ( $\Omega$ )	Reluctance $\mathfrak{R}$ , (A. t/ Wb)
Conductivité $\sigma$ , (1/ $\Omega$ .m)	Perméabilité $\mu$ , (Wb/A. m)
Loi d'Ohm $\mathbf{V} = \mathbf{RI}$	Loi d'Hopkinson $n\mathbf{I} = \mathfrak{R}\phi$

## 1.7. Transformateur

### 1.7.1. Rôle

Le transformateur est un convertisseur alternatif-alternatif. Il a pour rôle de modifier les amplitudes de grandeurs alternatives (tensions, courants) en maintenant la fréquence et la forme d'ondes inchangées, en vue d'adopter le récepteur (charge) au réseau électrique. Les transformateurs sont des machines statiques et possèdent un excellent rendement. Leur utilisation est primordiale pour le transport d'énergie électrique. Ils assurent l'élévation de la tension entre les alternateurs (source) et le réseau de transport, puis ils abaissent la tension du réseau pour l'exploiter par les utilisateurs.[2]

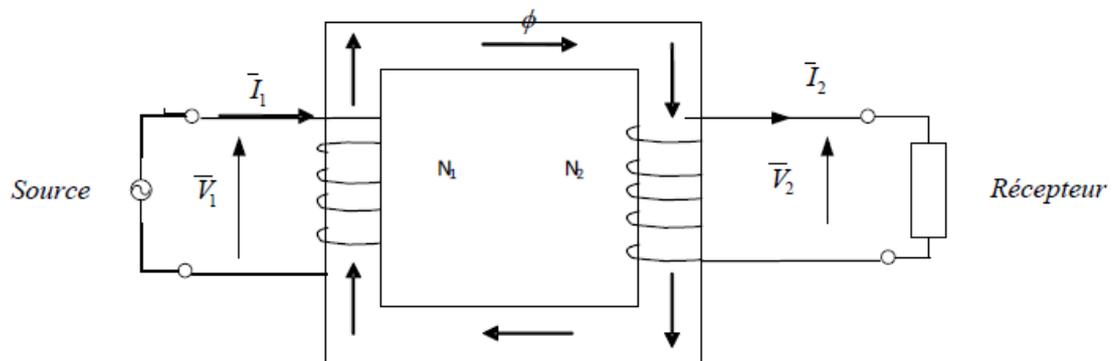


Figure 1.4. Rôle du transformateur

### 1.7.2. Symbole

Le transformateur peut être représenté par l'un des deux symboles suivants

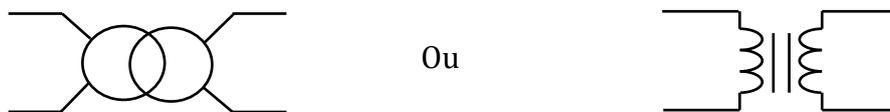


Figure 1.5. Symbole du transformateur

### 1.7.3. Constitution

Le transformateur est constitué de :

- ❖ Un circuit magnétique fermé, de grande perméabilité et feuilleté (constitué par des tôles de 0.2 à 0.3mm d'épaisseur).
- ❖ Un enroulement primaire possédant  $n_1$  spires, relié à la source alternative et se comporte comme un récepteur.

- ❖ Un ou plusieurs enroulements secondaires possédant  $n_2$  spires, il alimente une charge, on lui adopte la convention (générateur), les enroulements primaires et secondaires sont isolés électriquement, mais ils sont accouplés magnétiquement.

#### 1.7.4. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement est basé sur la loi d'induction électromagnétique (loi de Lenz). En effet, la tension alternative au primaire va créer un flux magnétique alternatif qui traversant l'enroulement secondaire produira une f. e. m induite (Loi de Faraday).

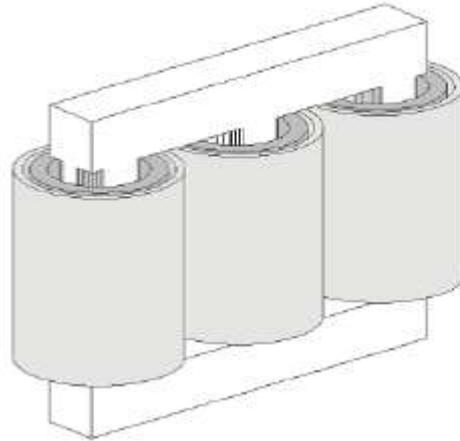
### 1.8. Différents types de transformateurs

#### 1.8.1. Transformateur de puissance :

Un transformateur de puissance est un composant électrique haute-tension essentiel dans l'exploitation des réseaux électriques. Sa définition selon la commission électrotechnique internationale (CEI) est la suivante : « Appareil statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et courant de valeurs généralement différentes, à la même fréquence, dans le but de transmettre la puissance électrique ». Sa principale utilité est de réduire les pertes dans les réseaux électriques. [3]

#### 1.8.2. Transformateur à colonnes

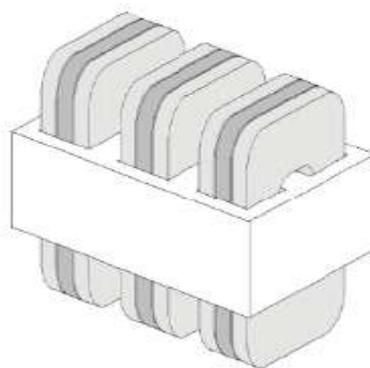
Le transformateur à colonnes est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur le noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités via des culasses afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique. [4] Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique de manière à maximiser le couplage tout en minimisant le volume des conducteurs Cette disposition plus simple que la précédente est utilisée pour les transformateurs à haute tension et les grandes puissances. Les enroulements peuvent être disposés sur un circuit magnétique comportant trois colonnes ou noyaux, ce type de circuit magnétique est dit à flux forcé. Si le déséquilibre est important, on utilise les transformateurs à quatre ou cinq colonnes, dont trois sont bobinées, les autres servent au retour des flux.



**Figure 1.6.** *Transformateur à colonnes.*

### 1.8.3. Transformateur cuirassé

Pour ce type de transformateur, le circuit magnétique entoure complètement l'enroulement des deux côtés. 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. Ces transformateurs sont utilisés principalement au sein des réseaux de transport et de répartition, où les surtensions transitoires sont fréquentes. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobinages. [5]



**Figure 1.7.** *Transformateur cuirassé*

#### **1.8.4. Transformateur immergé dans l'huile et transformateur sec**

Selon le type de refroidissement on distingue : les transformateurs à l'huile et les transformateurs secs.

##### **1.8.4.1. Transformateur à l'huile**

Pour prévenir l'action néfaste de l'air sur l'isolation des bobines et améliorer le refroidissement du transformateur, on place le noyau magnétique avec les enroulements dans une cuve remplie d'huile minérale. Malgré ces propriétés avantageuses, l'huile de transformateurs a deux défauts principaux : elle est inflammable et sa vapeur forme avec l'air dans certaines conditions un mélange explosif (la pollution de l'environnement).

En plus de son rôle de réservoir au liquide diélectrique, la cuve assure le maintien mécanique du circuit magnétique et des enroulements. La construction de la cuve généralement de forme ovale est liée au calcul thermique du transformateur. Le refroidissement du transformateur est d'autant plus difficile à réaliser que la puissance du transformateur est grande.

##### **1.8.4.2. Transformateur sec**

Les transformateurs immergés dans l'huile liquide à base minérale ou de silicone sont plus répandus pour les plus fortes puissances et les niveaux de tension élevés, mais présentent des risques de fuite, d'incendie et la pollution de l'environnement. Cela a permis de laisser la place aux transformateurs avec technologie sèche, avec des enroulements enrobés (imprégnés). Le système d'isolation électrique est remplacé par une résine (époxyde) et l'air. Des résines ont été développées pour résister aux tensions électriques et aux contraintes mécaniques, thermiques qui apparaissent dans un transformateur en service. L'aspect favorable est son comportement non inflammable et léger. Ce genre de transformateur est le plus appropriés pour la distribution de l'électricité en degré élevé de sûreté. [6]

#### **1.8.5. Transformateur de contrôle**

Les transformateurs de commande et contrôle sont généralement utilisés dans des circuits électroniques qui nécessitent une tension constante ou de courant constant avec une puissance faible ou volt - ampère attribuée.

### **1.8.6. Transformateur d'isolement**

C'est un transformateur qui crée une isolation galvanique entre son primaire et son secondaire, Ils servent à assurer la sécurité d'une installation en protégeant des électrocutions par exemple. La séparation galvanique permet aussi d'éliminer une partie du bruit électrique, ce qui est utile pour certains appareils électroniques sensibles. La composante continue du courant est en effet bloquée par un transformateur. Ce type est, largement utilisés dans les blocs opératoires : chaque salle du bloc est équipée de son propre transformateur d'isolement, pour éviter qu'un défaut dans un bloc n'affecte les autres.

### **1.8.7. Transformateur de potentiel**

Transformateur de potentiel (TP) baisse la tension d'un circuit à une valeur faible qui peut être efficacement et en toute sécurité utilisé pour le fonctionnement des instruments de mesure et de protection tels que voltmètres, wattmètres et relais.

### **1.8.8. Transformateur de distribution**

Les transformateurs de distribution sont des transformateurs utilisés pour fournir des quantités d'énergies relativement faibles aux clients. Ils sont utilisés à la fin du système de distribution des installations électriques.

### **1.8.9. Transformateur de mesure**

Selon la définition de la Commission électrotechnique internationale, un transformateur de mesure est un transformateur destiné à alimenter des appareils de mesure, des compteurs, des relais et autres appareils analogue. Ils sont utilisés pour permettre la mesure de la tension ou du courant quand ceux-ci sont trop élevés pour être mesurés directement. Ils doivent transformer la tension ou le courant de manière proportionnelle et sans déphasage.

### **1.8.10. Transformateur déphaseur**

Les transformateurs déphaseurs permettent de créer un déphasage entre leurs tensions d'entrée et de sortie. Cela a pour objectif de soulager un réseau surchargé. Le réseau de transport d'électricité est maillé ; l'électricité emprunte naturellement,

et préférentiellement les lignes de moindre résistance électrique. Cela explique que certaines lignes peuvent être saturées alors que d'autres lignes desservant la même zone peuvent être sous-utilisées.

### 1.8.11. Transformateur d'essai

Les transformateurs d'essai ou de test sont des transformateurs pouvant atteindre de très hautes tensions pour des charges limitées. Ils sont utilisés pour tester du matériel électrique.

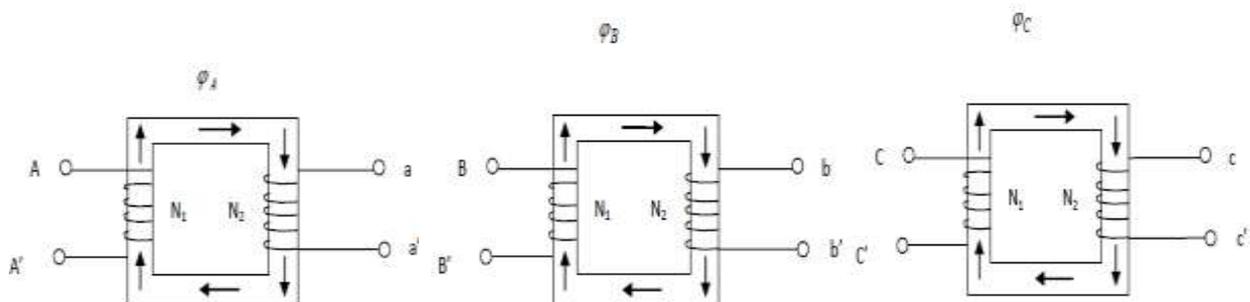
### 1.8.12. Autotransformateur

Dans ce type de transformateur particulier, il n'y a pas d'isolation électrique entre le primaire et le secondaire car le secondaire est une partie de l'enroulement primaire. Le courant alimentant le transformateur parcourt le primaire en totalité et une dérivation à un point donné de celui-ci détermine la sortie du secondaire.

## 1.9. Transformateur triphasé

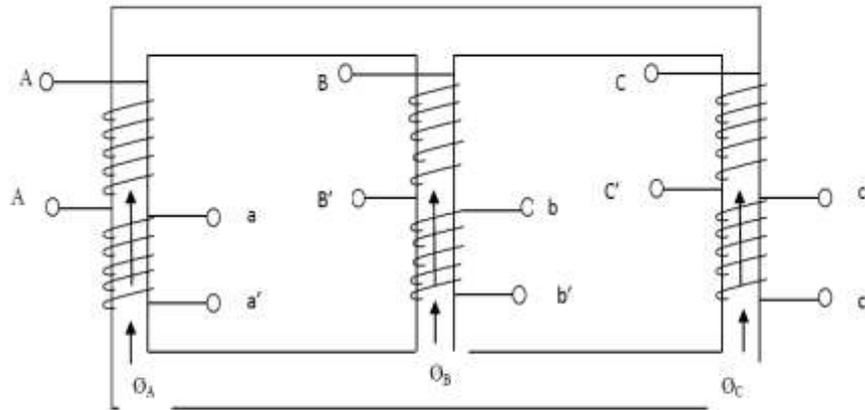
La production de l'énergie électrique et son transport se fait généralement en triphasé. Par ailleurs on démontre facilement que le transport de l'énergie en haute tension est plus économique d'où la nécessité d'employer des transformateurs élévateurs à la sortie de centrale de production et abaisseur tout proche des centres de consommation. [7] En effet pour modifier la tension d'un système triphasé on peut choisir d'utiliser :

Soit 3 transformateurs monophasés identiques



**Figure 1.8.** Trois transformateurs monophasés identiques

Soit un seul transformateur triphasé

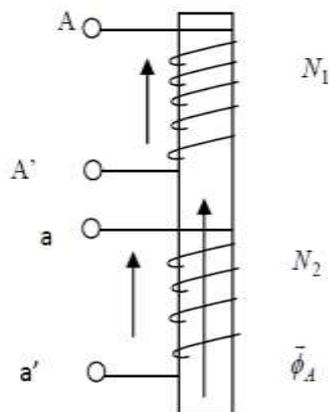


**Figure1.9.** Transformateur triphasé

### 1.9.1. Constitution du transformateur triphasé

Le circuit magnétique est formé de trois noyaux fermés par 2 culasses .Il est fabriqué en tôles Magnétiques feuilletées .chaque noyau porte :

- ❖ Un enroulement primaire
- ❖ Un ou plusieurs enroulements secondaires



**Figure1.10.** Disposition des enroulements autour du noyau

L'enroulement primaire (à  $n_1$  spires) et l'enroulement secondaire (à  $n_2$  spires) étant bobinés dans le même sens et traversés par le même flux. Les tensions  $\vec{V}_A$  et  $\vec{V}_a$  sont en phase.

### 1.9.2. Mode de connexion

Au primaire les enroulements peuvent être connectés soit en étoile (Y) soit en triangle (D). Au secondaire les enroulements peuvent être connectés de 3 manières différentes : étoile(Y), triangle(D) et zigzag(Z)

#### 1.9.2.1. Connexion étoile

Dans la connexion étoile chaque enroulement de phase d'un transformateur triphasé est connecté à un point commun (point neutre). L'autre extrémité étant reliée à la borne de ligne correspondante. Elle est représentée par la lettre Y

#### 1.9.2.2. Connexion triangle

Dans la connexion triangle, la connexion des enroulements de phase d'un transformateur triphasé est effectuée de manière à réaliser un circuit fermé. Elle est représentée par la lettre D ou  $\Delta$ .

#### 1.9.2.3. Connexion Zigzag

Dans la connexion Zigzag la connexion des enroulements consistant en deux sections d'enroulement, la première section étant connectée en étoile et la seconde en série entre la première section et les bornes de ligne. Elle est représentée par la lettre Z.

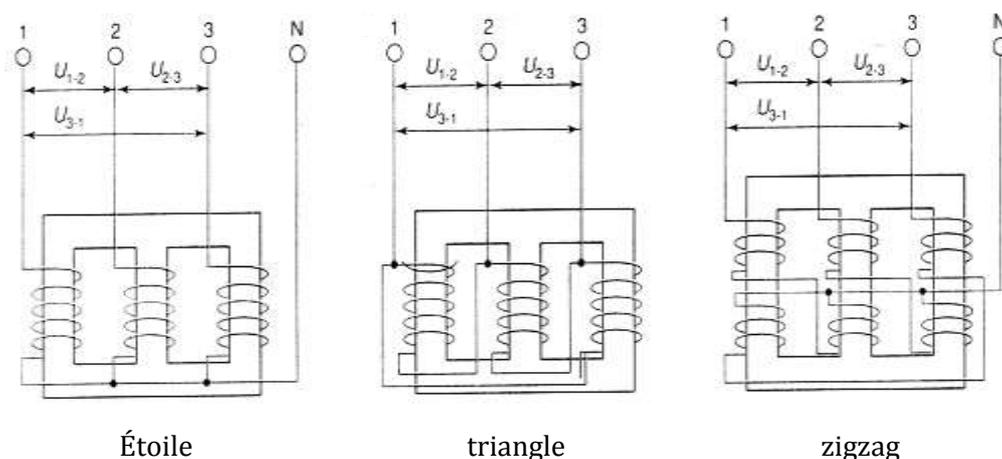


Figure 1.11. Types de connexion

## **1.10. Contraintes**

Un réseau électrique doit fournir une énergie avec une meilleure qualité possible. Cette qualité se dégrade avec l'apparition des anomalies dont la durée peut conduire à des arrêts des fonctionnements prolongés. [8]

Nous passerons rapidement en revue dans cette analyse, les défauts que l'on rencontre couramment sur les transformateurs.

### **1.10.1. Surtension**

Les surtensions sont dangereuses dans un réseau de distribution car elles soumettent les isolants à des contraintes qui risquent de les détruire ou du moins de les vieillir. Les surtensions de longue durée augmentent le courant magnétisant des transformateurs, d'autant plus que leur circuit magnétique est saturé

### **1.10.2. Court-circuit**

Un court-circuit est la disparition intempestive de l'isolement relatif de deux conducteurs de tensions différentes à la même source, sans interposition d'une impédance convenable.

### **1.10.3. Surcharges**

Les surcharges sont dues essentiellement à une augmentation de la demande d'énergie, mais parfois aussi à un dimensionnement incorrect des équipements qui composent les installations électriques. Les surcharges se caractérisent par des courants supérieurs aux courants maximums admissibles. Si ces courants se maintiennent trop longtemps ils peuvent d'une part endommager les matières isolantes et d'autre part provoquer la rupture des conducteurs par suite de la dégradation de leur résistance mécanique.

### **1.11. Régimes de fonctionnement du transformateur**

Les régimes de fonctionnement des transformateurs sont les régimes de surcharge les régimes déséquilibrés et les régimes transitoires. [9]

#### **1.11.1. Régime de surcharge**

Les transformateurs d'interconnexion de grandes puissances de réseau électrique doivent supporter les variations de la charge du réseau électrique. Ils sont soumis à des surcharges plus ou moins fortes et sur des durées plus ou moins longues.

#### **1.11.2. Régime déséquilibré**

Le régime déséquilibré correspond à un incident sur l'une des trois phases du réseau. La composante homopolaire du courant dans les bobines devient importante, entraînant un déséquilibre des ampères tours du circuit magnétique et par conséquent une augmentation des pertes supplémentaires dans le fer et le cuivre provoquant des surchauffes locales considérables.

#### **1.11.3. Régime transitoire**

Les phénomènes transitoires dans le transformateur sont causés d'une part par les enclenchements d'autre part par les courts-circuits. Les enclenchements engendrent des surtensions, qui peuvent détériorer l'isolation. Les courts-circuits créent des surintensités qui engendrent des échauffements et des efforts électrodynamiques importants au niveau des enroulements.

### **1.12. Conclusion**

Dans ce chapitre on a donné quelques généralités et notions de base sur un transformateur de puissance. Nous avons vu quelques notions de base sur le magnétisme, le principe, la construction, les types, les contraintes et les régimes de fonctionnement.

Le prochain chapitre sera consacré à la modélisation électromagnétique des transformateurs et les phénomènes transitoires dans un transformateur de puissance.

---

# CHAPITRE 02

## MODELISATION DES TRANSFORMATEURS

---

### 2.1. Introduction

La modélisation des transformateurs est un domaine très vaste et généralement les modèles sont employés pour la simulation des comportements transitoires. Une représentation exacte de chaque situation transitoire exige un modèle convenable pour une gamme de fréquences allant de 0 à plusieurs mégahertz. Des modèles de transformateurs peuvent être développés pour être précis pour une gamme spécifique de fréquence

L'étude phénoménologique de ces problèmes nous conduit à étudier l'interaction entre les ondes électromagnétiques du transformateur. Nous présenterons, dans ce chapitre, les modèles usuels du transformateur et les modèles électromagnétique, modélisation des transformateurs monophasé linéaire sans saturation et avec saturation.

Différentes formulations électromagnétique ont été élaborées dans la littérature pour résoudre ces équations. Parmi ces formulations, nous exposerons celles qui sont les mieux adaptées à la modélisation des transformateurs.

Nous présentons dans cet essai, les bases mathématiques des équations électromagnétiques pour la modélisation d'un problème électrotechnique, à travers le rappel des équations de Maxwell, ainsi que la méthode des éléments finis.

### 2.2. Modèles usuels du transformateur

#### 2.2.1. Modèle RESEL

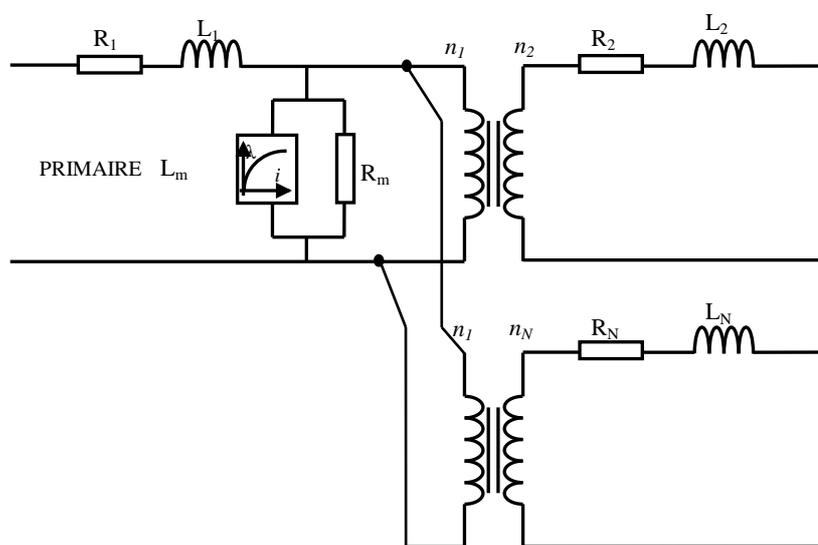
RESEL est un logiciel conversationnel pour l'analyse des régimes transitoires dans les réseaux électriques, son premier objectif était l'étude des phénomènes transitoires dans les transformateurs [10]. Il nécessite la modélisation du transformateur à l'aide de deux schémas couplés. L'un traduit le comportement électrique transformateur, l'autre exprime son comportement magnétique. Le circuit électrique est composé de plusieurs cellules

résistances, capacités et forces électro-motrices. L'association de ces cellules dépend des techniques de bobinage du transformateur. Le circuit magnétique est composé d'un réseau de réluctances et de forces électro-motrices. Les sources du circuit électrique sont liées aux variations de flux du circuit magnétique. Les sources du circuit magnétique sont liées au courant dans les enroulements. Pour prendre en compte les effets de la fréquence, le circuit magnétique est décomposé en éléments de géométrie simple pour lesquels la résolution des équations de Maxwell est relativement simple. Les réluctances complexes ainsi calculées se composent de cellules résistances - inductances.

### 2.2.2. Modèle EMTP

EMTP (Electro Magnetic Transients Program) est le logiciel de simulation, des régimes transitoires et permanents des réseaux électriques, qui sont considérés comme un standard dans les études temporelles et fréquentielles [11]. Modèle est bien adapté pour les études des réseaux, mais il ne convient pas aux études internes du transformateur. Le modèle EMTP présente pour certains cas, une inadaptation du transformateur réel, par exemple un transformateur monophasé à deux enroulements égaux haute tension et basse tension, dont le modèle n'est pas symétrique et l'inductance de court-circuit n'est pas la même vue du primaire et du secondaire.

Un modèle de transformateur saturable (monophasé ou triphasé) de N enroulements peut être basé sur une représentation étoile comme montré dans la figure 2.1



**Figure 2.1.** Circuit de base de transformateur saturable.

Les effets de saturation et d'hystérésis peuvent être modélisés par l'ajout d'une inductance non linéaire supplémentaire au point neutre.

### 2.2.3. Modèle L'ATP

L'ATP (Alternative Transients Program) est un des logiciels les plus utilisés au monde qui est très puissant dans le calcul des régimes transitoires dans les systèmes électro-énergétiques. En plus du module principal de simulation, le logiciel est doté de plusieurs supports de calcul. Ces supports (routines) peuvent être utilisés pour générer les données nécessaires des modèles pour le calcul des constantes de la ligne ou encore pour la dérivation de la matrice RL couplée, utilisée pour la représentation des transformateurs polyphasés à plusieurs enroulements dans les simulations temporelles. [12]

## 2.3. Modélisation des transformateurs

Comme pour tout composant d'un réseau électrique, sa modélisation dépend du type de phénomène à étudier, c'est-à-dire de la gamme de fréquences concernée. Il est connu que l'impédance des composantes inductives augmente avec la fréquence, alors que, inversement, l'impédance des composantes capacitives diminue avec la fréquence :

$$\begin{aligned} Z_L &= \omega L \\ Z_C &= \frac{1}{\omega C} \end{aligned} \quad (11)$$

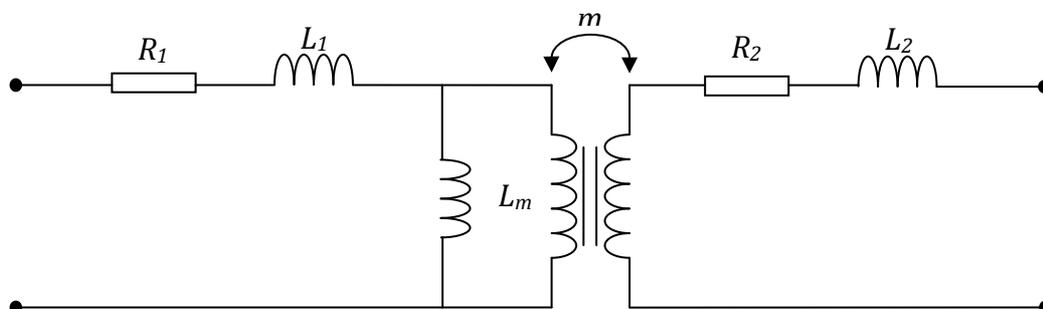
Ainsi, avec l'augmentation de la fréquence considérée, l'importance des composantes inductives s'amenuise et celle des composantes capacitives croît. Autrement dit, à basse fréquence,  $Z_C$  est très grand, le composant capacitif peut être considéré comme un circuit ouvert.

### 2.3.1. Transformateur monophasé linéaire sans saturation

Un transformateur présente un comportement non linéaire dû principalement à la caractéristique de l'inductance. Lorsque le fonctionnement du transformateur se situe dans la zone linéaire de cette caractéristique, alors la modélisation devient simple. Celle-ci se traduit par un schéma équivalent (figure 2.2) où l'on représente ses impédances linéaires et son rapport de transformation  $m$ .

L'impédance linéaire est composée, pour chaque enroulement, d'une inductance

modélisant le flux magnétique de fuite et d'une résistance modélisant les pertes par effet Joule et les pertes supplémentaires (perte dans les parois de Bloch [13]). Il faut aussi ajouter une branche parallèle pour représenter l'inductance de magnétisation. On a donc le schéma classique suivant :



**Figure 2.2.** *Modèle sans saturation.*

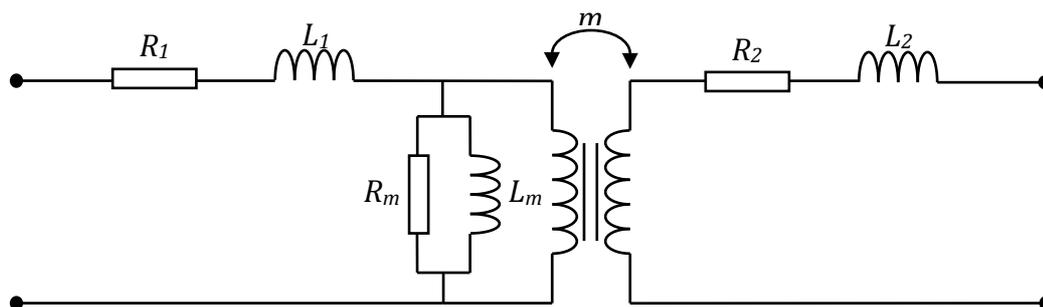
Avec :

$R_1, L_1$  : Résistance et inductance de l'enroulement primaire.

$R_2, L_2$  : Résistance et inductance de l'enroulement secondaire.

$L_m$  : Inductance de magnétisation du circuit magnétique.

Il existe éventuellement des pertes à vide, nous pouvons les représenter au moyen d'une résistance  $R_m$  en parallèle (figure 2.3):

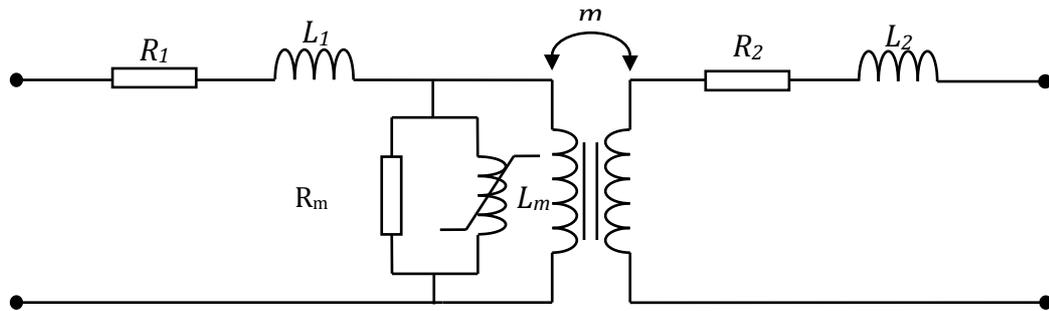


**Figure 2.3.** *Modèle avec pertes fer, sans saturation.*

$R_m$  : Résistance qui représente les pertes fer dans le circuit magnétique.

### 2.3.2. Transformateur monophasé avec saturation

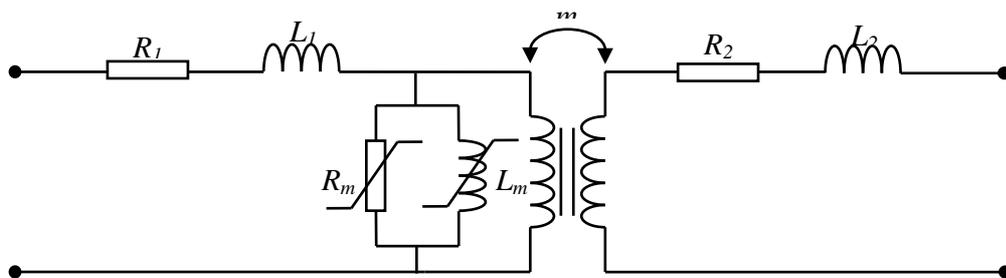
Dans ce modèle l'inductance  $L_m$  est remplacée par une inductance non linéaire dont la caractéristique de saturation est donnée par une courbe du flux dans le noyau en fonction du courant magnétisant inductif.



**Figure 2.4.** *Modèle avec saturation.*

### 2.3.3. Transformateur monophasé avec saturation et perte fer

Dans ce modèle la résistance  $R_m$  est remplacée par une résistance non linéaire dont la caractéristique est donnée par la courbe de la tension à vide en fonction du courant magnétisant résistif (Figure 2.5).



**Figure 2.5.** *Modèle avec pertes fer, avec saturation.*

## 2.4. Modèles électromagnétiques

Ces modèles décrivent les lois et le formalisme de l'interaction entre les ondes électromagnétiques et le matériau. Ce formalisme conduit souvent à des équations aux dérivées partielles nécessitant une méthode de résolution numérique [14].

### 2.4.1. Equations électromagnétiques

Les variations temporelles et spatiales des ondes électromagnétiques sont régies par les équations de Maxwell [15]. Celle-ci s'appliquent sur les grandeurs électriques et magnétiques : le champ magnétique  $H$ , le champ électrique  $E$ , le déplacement ou induction électrique  $D$ , les densités de courant  $J$  et les densités de charges électriques libres.

### 2.4.1.1. Equations de Maxwell

la répartition spatiale et temporelle des champs magnétique et électrique est donnée par les équations de maxwell [16] [17].

$$\text{div} \vec{D} = \rho \rightarrow \iint_S \vec{D} \cdot \vec{ds} = \iiint_V \rho \vec{dV} = Qi \quad \text{Loi De Maxwell-Gauss} \quad (12)$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \rightarrow \oint \vec{E} \cdot \vec{dl} = -\frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot \vec{ds} \quad \text{Loi De Maxwell-Faraday} \quad (13)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \rightarrow \iint_S \vec{B} \cdot \vec{ds} = 0 \quad \text{Loi De Conservation De Flux} \quad (14)$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \rightarrow \oint \vec{H} \cdot \vec{dl} = \iint_S \left( \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \vec{ds} \quad \text{Loi De Maxwell- Ampère} \quad (15)$$

Avec :

$H$  : Champ magnétique [A/m]

$B$  : Induction magnétique [T]

$E$  : Champ électrique [V/m]

$D$  : Induction électrique [C/m<sup>2</sup>]

$J_c$  : Densité de courant de conduction [A/m<sup>2</sup>]

$\rho$  : Densité de charge volumique [C/m<sup>3</sup>]

$t$  : Le temps [s]

$Qi$  : charge contenue dans le volume V [C]

$ds$  : Élément de surface [m<sup>2</sup>]

$dV$  : Élément de volume [m<sup>3</sup>]

$dl$  : Élément de longueur [m]

Ces équations sont associées aux relations constitutives des matériaux qui sont en général anisotropes ou non linéaires.

### 2.4.1.2 Equation de Maxwell simplifiés

Les equation de maxwell s'écrivent sous la forme suivante :

$$\text{div} \vec{D} = 0 \quad (16)$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (17)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (18)$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \sigma \vec{E} + \vec{J}_s \quad (19)$$

### 2.4.1.3. La loi d'Ohm

C'est la loi exprimant, dans un milieu conducteur la densité de courant en fonction du champ électrique, la loi s'applique à tout milieu présentant une conductivité électrique.

$$\begin{cases} \vec{J}_c = \sigma \vec{E} & \text{milieu conducteur} \\ \vec{J}_c = \sigma \vec{E} + \vec{J}_s & \text{milieu conducteur avec source} \end{cases} \quad \begin{matrix} (20) \\ (21) \end{matrix}$$

$\vec{J}_s$ : Densité de courant source  $A/m^2$

### 2.4.1.4. Relations constitutives des matériaux

En considérant que les champs varient lentement dans le temps, ces relations se limitent aux premiers termes de leurs développements respectifs en série de Taylor :

$$D = \varepsilon E = \varepsilon_0 \varepsilon_r E \quad (22)$$

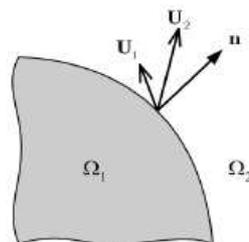
$$B = \varepsilon H + B_r = \mu_0 \mu_r H + B_r \quad (23)$$

$$J = J_0 + \sigma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (24)$$

$\varepsilon$ ,  $\mu$  et  $\sigma$  représente respectivement la permittivité électrique, la perméabilité magnétique et la conductivité électrique du matériaux.  $B_r$  représente l'induction rémanente due au cycle d'hystérésis et sera négligée de part la nature 'douce' du matériau ferromagnétique utilisé dans les transformateurs.  $J_0$  est la densité de courant source.

### 2.4.1.5. Conditions de passage

Les grandeurs électromagnétiques pourraient être discontinues à l'interface entre deux milieux de propriétés différentes. Les conditions de passage permettent alors d'exprimer les relations entre deux grandeurs  $U_1$  et  $U_2$  sur ces frontières [18].



**Figure 2.6.** Interface deux milieux

$$n.(D_2 - D_1) = \rho_s \quad (25)$$

$$n.(B_2 - B_1) = 0 \quad (26)$$

$$n.(E_2 - E_1) = 0 \quad (27)$$

$$n.(H_2 - H_1) = K_s \quad (28)$$

$K_s$  et  $\rho_s$  sont respectivement les densités de courant et de charges surfaciques et  $n$  la normale unitaire à l'interface orientée du milieu d'indice 1 vers celui d'indice 2, Figure (2.6). Pour  $K_s$  et  $\rho_s$  négligeable, les équations ci-dessus expriment une conservation des composantes normale ou tangentielle des champs associés à l'interface.

Au-delà des milieux traversée par les ondes , le domaine d'étude n'est pas infini et nécessite l'emploi de condition supplémentaires à ses frontières.

#### 2.4.1.6. Conditions aux limites spatiales et temporelles

Les valeurs d'un champ  $U$  aux frontières peuvent satisfaire principalement deux conditions simples, voire des formulations particulières. Ainsi aux limites du domaine ce champ peut être soit normal ( domaine symétrique ) soit de valeur connue qui se traduit par [19]:

$$\text{Condition de Neumann : } \frac{\partial U}{\partial n} = 0 \quad (29)$$

$$\text{Condition de Dirichlet : } U \cdot n = 0 \quad (30)$$

Les conditions aux limites temporelles sont en général fixées à des valeurs nulles à l'instant initial.

### 2.5. La méthode des éléments finis

La méthode des élément finis est une méthode incontournable lorsque l'on traite la modélisation des milieux continus. Son domaine d'application très étendu fait probablement d'elle le premier outil de conception. Ainsi, appliquée au domaine de l'électromagnétisme, elle permet d'étudier des problèmes aux formes complexe, avec des matériaux linéaires ou non, des couplage circuits, du mouvement ....etc. de fait de sa prise en compte des phénomènes au niveau local, sans injection de connaissance a priori, elle est la méthode à utiliser pour comprendre finement les phénomènes physique en jeu dans un dispositif [20], L'utilisation d'un maillage pour approcher le problème réel demande un nombre de nœud important et préjudiciable au temps de calcul.

De plus cette méthode trouve ses limites lorsque le domaine d'étude présente de singularités. Pour cela le calcul électromagnétique comportera deux étapes :

Une première non linéaire sera basée sur un potentiel scalaire magnétique réduit pour la détermination des pertes fer dans le noyau ferromagnétique. Une seconde s'appuyant sur le potentiel scalaire magnétique total permettra d'évaluer les pertes Joule en régime harmonique dans les enroulements.

### 2.5.1. Formulation électromagnétique

Nous avons brièvement présenté les différentes formulations électromagnétiques. Notre choix s'est porté sur la formulation en potentiel scalaire magnétique en raison, entre autres, de son faible coût algorithmique. Nous développerons ici la mise en oeuvre de cette formulation dans le cas des transformateurs et nous nous intéresserons au choix du potentiel le mieux adapté

#### 2.5.1.1. Formulation en potentiel scalaire magnétique total

Dans une région sans aucune source de courant, l'équation d'Ampère devient :

$$\nabla \times H = 0 \quad (33)$$

Cela signifie que H dérive d'un potentiel scalaire appelé dans ce cas le potentiel scalaire magnétique total  $\phi_t$  :

$$H = -\nabla \phi_t \quad (34)$$

Dans ce cas, l'équation différentielle à résoudre est donnée par la loi de conservation du flux

$$\nabla \times B = -\nabla \times (\mu \nabla \phi_t) = 0 \quad (35)$$

#### 2.5.1.2 Formulation en potentiel scalaire magnétique réduit

Pour tenir compte des courants sources, on utilise le potentiel scalaire magnétique réduit  $\phi_r$  :

$$H = H_0 - H_r = H_0 - \nabla \phi_r \quad (36)$$

Où  $H_0$  est le champ source calculé par la méthode de Biot et Savart et  $H_r$  le champ réduit dû aux régions ferromagnétiques et/ou conductrices perturbant le champ  $H_0$ . Dans un transformateur, le champ réduit provient essentiellement de la présence du circuit magnétique et dans une moindre mesure des tôles et de la cuve.

L'équation à résoudre dans ce cas est la suivante :

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \nabla \cdot (\mu(\mathbf{H}_0 - \nabla \phi_r)) = 0 \quad (37)$$

Ou sous la forme variationnelle lié à l'utilisation des éléments finis ( $i, j=1$  à  $3$ ) :

$$\int_{\Omega} \nabla \alpha \cdot \mu \nabla \phi_r j \, d\Omega + \int_{\Gamma_R} \alpha \cdot \mu H_n \, d\Omega = \int_{\Omega} \nabla \alpha_i \mu H_0 \, d\Omega \quad (38)$$

Dans l'équation précédente, le calcul contraignant du champ source peut néanmoins se ramener à une intégrale surfacique limitée à l'interface entre deux matériaux présentant des perméabilités ( $\mu_{r1}$  et  $\mu_{r2}$ ) différentes et constantes

$$\int_{\Omega} \nabla \alpha \cdot \mu H_0 \, d\Omega + \int_{\Gamma} \alpha_i \cdot \mu_0 (\mu_{r1} - \mu_{r2}) H_0 \cdot \mathbf{n} \, d\Omega \quad (39)$$

Lorsque la perméabilité d'un milieu est importante, la formulation en potentiel scalaire magnétique réduit  $\phi_r$  engendre une mauvaise précision dans les calculs. En effet, le champ  $H$ , alors assez faible dans le noyau, résulte de la différence entre les champs  $H_0$  et  $H_r$  très grands (36). Dans ce cas, un couplage entre les formulations en potentiels scalaires total (fer) et réduit (air) s'avère être un choix judicieux permettant de tenir compte à la fois des courants sources et des régions ferromagnétiques.

## 2.6. Phénomènes d'enclenchement du transformateur de puissance

### 2.6.1. Courant d'appel du transformateur

Le transformateur de puissance est un élément indispensable des réseaux électriques. La mise hors tension du transformateur génère peu de transitoires. Les transitoires se produisent surtout lors de l'enclenchement. L'enclenchement aléatoire des transformateurs peut produire des courants de formes asymétriques, de très grandes amplitudes, appelés « courants d'appel ». Ces courants sont riches en harmoniques et possèdent une composante apériodique. Pour mieux comprendre ce phénomène électrique, il est nécessaire de tout d'abord étudier un phénomène magnétique, le flux rémanent [21].

Il ya plusieurs facteurs qui commandent l'importance et la durée du courant magnétisant d'appel :

1. Taille du transformateur.
2. Force du système d'alimentation auquel le transformateur est relié.

3. Résistance dans le système à partir de la source équivalente au transformateur.
4. Type de fer utilisé dans le noyau de transformateur.

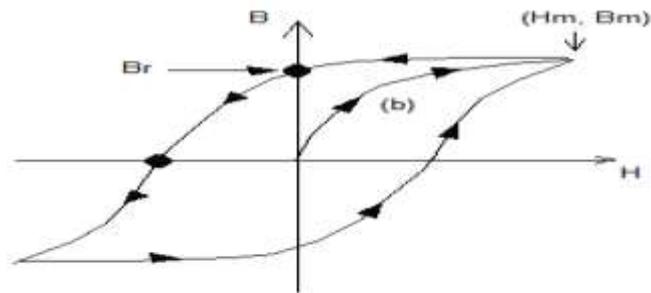
### 2.6.2. Effets du courant d'appel

Les courants d'appel transitoires de transformateur peuvent dépasser le courant nominal et peuvent atteindre la valeur considérée du courant de court-circuit du transformateur de puissance. L'amplitude se dégrade très lentement et atteint son courant magnétisant équilibré après quelques secondes. Les courants d'appel transitoires ayant une composante élevée de courant continue et étant riches en harmoniques de 1ère et 2ème ordre agit sur la qualité de puissance et peuvent déclencher les relais de protection.

A cause de ces transitoires, des forces énormes surgissent dans les enroulements de transformateur de puissance qui peuvent réduire leur durée de vie et par suite ces courants d'appel sont très néfastes pour ces composants surtout que l'on sait qu'ils sont très chers et très importants dans les systèmes électro-énergétiques.

### 2.6.3. Champ magnétique rémanent

Il est connu que si l'on fait circuler un courant  $I$  dans une bobine entourant un tore magnétique, la densité de flux  $B$  dans le circuit magnétique augmente avec le champ magnétique  $H$ . Si le flux initial est nul, cette augmentation suit la courbe (b) de la figure ci-dessus, la densité de flux atteint la valeur  $B_m$  pour un champ magnétique  $H_m$ . Si, maintenant, on fait décroître le courant  $I$ , et donc le champ  $H$  jusqu'à l'évanouissement, la densité de flux ne suit plus la même courbe, mais une courbe située au dessus de (b). En effet, quand on réduit le champ à zéro, les domaines que l'on vient d'orienter sous l'influence du champ  $H_m$  tendent à conserver cette orientation : c'est le phénomène d'hystérésis. Donc, lorsque le champ  $H$  devient nul, une densité de flux subsiste et conserve une valeur  $B(r)$  que l'on appelle densité de flux rémanent.

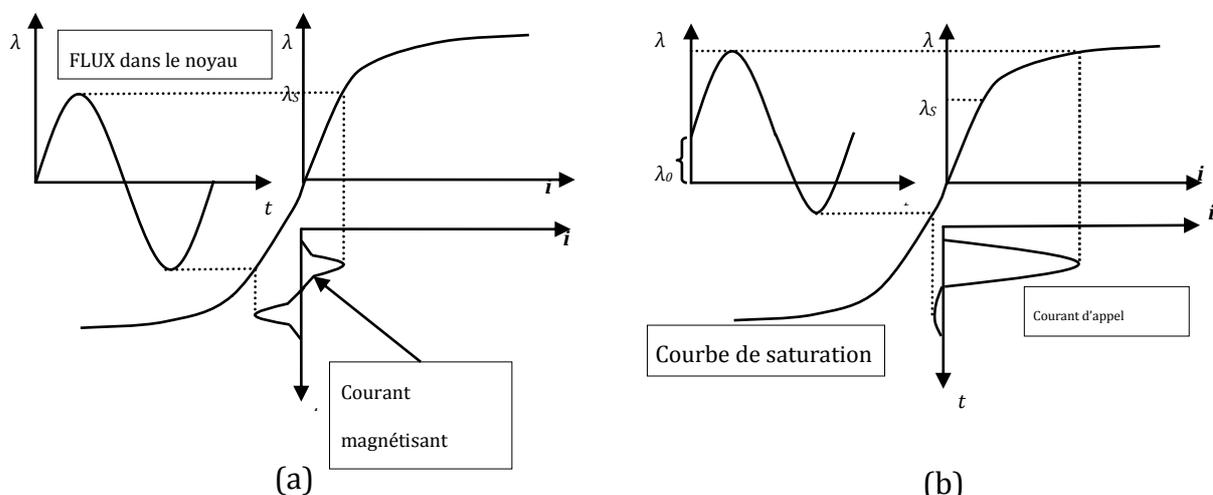


**Figure 2.7.** Cycle d'hystérésis

Revenons maintenant au transformateur de puissance, la mise hors tension de celui-ci laisse son noyau avec un état magnétique rémanent. Si le transformateur n'est pas complètement démagnétisé après la mise hors tension, cet état magnétique persiste jusqu'à l'instant d'enclenchement et peut donc produire des phénomènes transitoires.

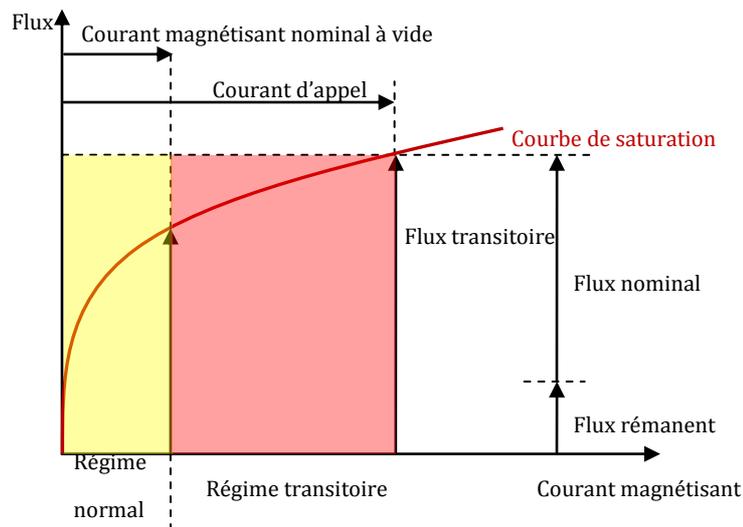
#### 2.6.4. Courant d'appel en fonction de flux rémanent

En régime établi, il est connu que le transformateur fonctionne à des niveaux de flux inférieurs au flux de saturation comme indiqué dans la figure (2.8 a). Or, pour un ré enclenchement du transformateur après la mise hors tension, il est possible que le flux dynamique ait des valeurs supérieures au flux de saturation, le maximum du courant peut être largement plus grand que sa valeur crête en régime établi selon la courbe du flux vs. Courant du transformateur comme indiqué dans la figure (2.8 b). Ce dépassement du flux peut être expliqué par la présence du flux rémanent qui pousse la mise sous tension dans la zone de saturation comme montré par la figure (2.9), d'où l'origine du courant d'appel.



**Figure 2.8.** Caractéristiques flux, courant magnétisant

(a) Régime permanent  $\lambda < \lambda_s$ , (b) Régime transitoire  $\lambda > \lambda_s$ ,



**Figure 2.9.** Deux régimes sur la courbe de saturation.

En effet, en régime établi, les transformateurs fonctionnent dans une zone dite linéaire où la magnétisation ne demande que peu de puissance (peu de force magnétomotrice, peu de courant).

En revanche, certains régimes sollicitent une zone au-delà de la zone linéaire, dite zone saturée, où on atteint les limites du matériau ferromagnétique où la magnétisation demande beaucoup plus de puissance (de courant).

Ainsi, l'amplitude du courant magnétisant peut atteindre en zone saturée (alors que le transformateur est à vide) plusieurs fois celle du courant nominal. Le rapport du courant magnétisant en zone saturée sur le courant nominal dépend de la puissance des transformateurs. En pratique, pour les gros transformateurs, le courant d'appel peut atteindre une valeur de l'ordre de 7 à 10 fois le courant nominal avec des constantes de temps de quelques secondes.

Il n'existe à l'heure actuelle pas de dispositifs de démagnétisation à installer à l'intérieur du transformateur pour supprimer le flux rémanent après la mise hors tension. Conceptuellement, les enroulements du transformateur pourraient remplir un tel rôle. En théorie, il faudrait réduire la tension alternative graduellement à zéro ou injecter un courant alternatif suffisant et en réduire graduellement l'amplitude. Mais en pratique, les conditions d'exploitation sur site ne le permettent pas à cause de la nécessité des installations supplémentaire en interne.

## 2.7. Conclusion

Ce deuxième chapitre nous a permis de présenter la modélisation des transformateurs, les différents modèles qui peuvent être utilisés dans les simulations transitoires. Du point de vue modélisation. Ces modèles permettent de reproduire certains comportements électro magnétiques du transformateur. Mais masque en réalité des phénomènes plus complexes et comme tout modèle souffre d'hypothèses simplificatrices. Ces hypothèses conduisent cependant à des paramètres de représentation trop idéalisés pour les applications industrielles actuelle. Les difficultés de modélisation nécessitent le recours aux méthodes numériques tel que la méthode des éléments finis, ces modèles sont les plus répandus et utilisés, à l'heure actuelle, pour modéliser un transformateur.

Le prochain chapitre sera consacré à la simulation de courant d'appel dans un transformateur de puissance.

---

# CHAPITRE 03

---

## SIMULATION DU COURANT D'APPEL

---

### 3.1 Introduction

Le transformateur de puissance est un élément indispensable dans les réseaux électriques, mis à part les élévations accidentelles de tension, par exemple branchement d'un transformateur 230 V en 500 V, les seules élévations de tension qui peuvent dépasser la plage nominale de variation  $U_n + 10\%$  s'observent lorsque le réseau n'est pas chargé, la saturation du noyau ferromagnétique du transformateur est la cause principale d'un courant d'appel transitoire [22]. Cette saturation est due à un changement brusque de la tension de système qui peut être provoquée par les transitoires de commutations, par l'excitation d'un transformateur à vide, le flux dans le noyau peut atteindre une valeur théorique maximale de deux à trois fois la valeur crête nominale de flux.

On commence ce chapitre par la simulation du courant d'appel dans le cas monophasé et triphasé. Dans les deux cas on va voir l'influence de résistance et le moment de fermeture de disjoncteur. Ce chapitre résume quelques modèles de transformateur pour la simulation des transitoires de basse fréquence, les transitoires des courants d'appel.

### 3.2. Objet d'essai (Application sur les transformateurs)

Simulation du courant d'appel a été réalisée au niveau de logiciel Matlab. On a utilisé les transformateurs monophasés et triphasé 150 MVA (Figure 3.3) et 450 MVA (Figure 3.24) respectivement.

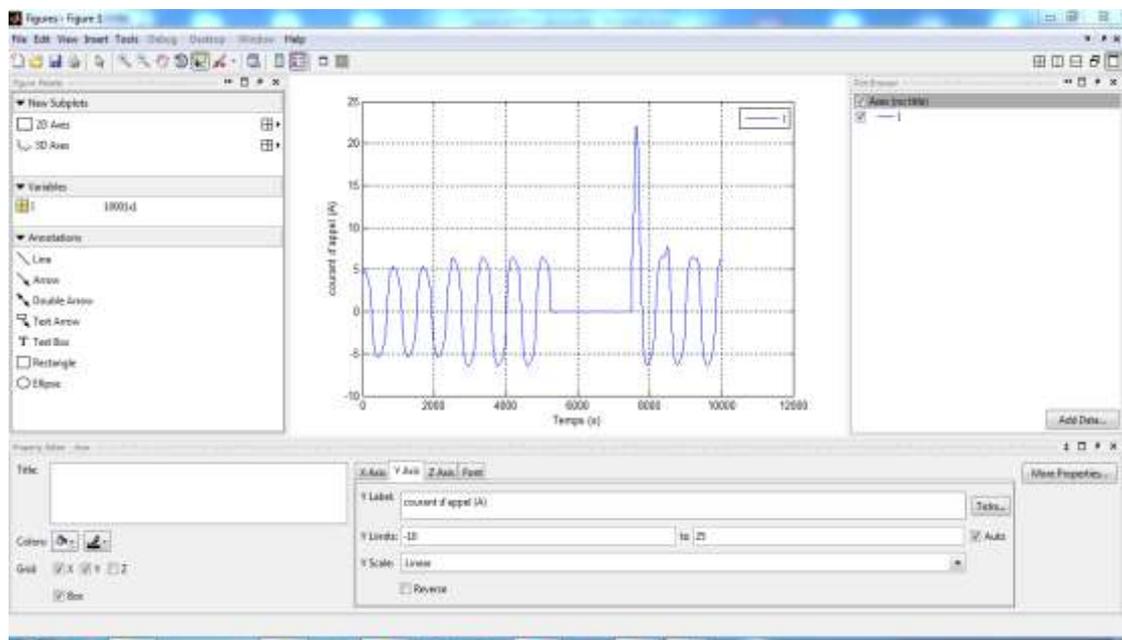
### 3.3. Simulation de courant d'appel

Le Matlab est un logiciel de calcul numérique produit par Math Works; Il est disponible sur plusieurs plates formes. Matlab est un langage simple et très efficace, optimisé pour le traitement des matrices, d'où son nom. Pour le calcul numérique, Matlab est beaucoup plus concis que les "vieux" langages (C, Pascal, Fortran, Basic). Les utilisations typiques incluent : Maths et calcul

- Développement d'algorithme

- Simulation de modélisation, et prototypage
- Exploration d'analyse de données, et visualisation
- Graphiques scientifiques et techniques
- Développement d'applications, compris l'utilisation d'interface graphique

Le Matlab est un système interactif dont l'élément de base de données est un tableau qui ne nécessite pas de dimensionnement. Cela vous permet de résoudre de nombreux problèmes informatiques techniques, en particulier ceux forme avec des matrices et vecteurs, en une fraction du temps.



**Figure 3.1.** Interface graphique de mesure (Matlab)

Le Matlab a évolué sur une période de plusieurs années avec la participation de nombreux utilisateurs. Dans les environnements universitaires, il est l'outil pédagogique standard pour des cours d'initiation et de perfectionnement en mathématiques, en génie et en sciences. Dans l'industrie, Matlab est un outil de choix pour la recherche de haute productivité, de développement et d'analyse.

### 3.3.1. Simulation

Matlab est un logiciel de modélisation système multi physique édité par l'entreprise américaine The Math Works. La simulation est une plate-forme de la modélisation de systèmes dynamiques.

Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal. Simulink est intégré à MATLAB, fournissant ainsi un accès immédiat aux nombreux outils de développement algorithmique, de visualisation et d'analyse de données de MATLAB. Les paramètres pour les deux transformateurs sont montrés dans le tableau suivant :

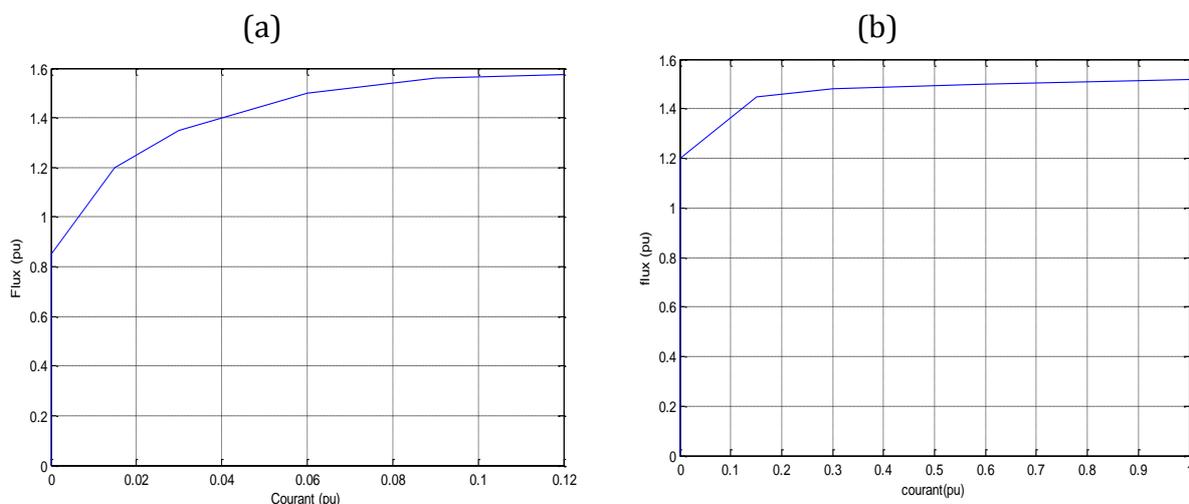
**Tableau 3.1.** Les paramètres pour les deux transformateurs monophasé, triphasé.

	Monophasé	Triphasé
U1 (kV)	500	500
U2 (KV)	230	230
$S_p$ (MVA)	150	450

**Tableau 3.2.** Caractéristique de la saturation de transformateur monophasé et triphasé.

Courant (pu)	Flux (pu)	Courant (pu) triphasé	Flux (pu) triphasé
0.0	0.85	0.0	1.2
0.015	1.2	0.15	1.45
0.03	1.35	0.3	1.48
0.06	1.5	0.6	1.5
0.09	1.56	1.0	1.52
0.12	1.572		

La figure (3.2) représente la courbe de saturation  $flux = f(i)$  du transformateur monophasé, triphasé (valeurs du tableau 3.2).



**Figure 3.2.** Courbe de saturation de transformateur monophasé (a) triphasé (b).

Le Courant augmente quand le flux atteint le point de saturation, les façons dont la saturation provoque une grave accumulation de courant d'excitation. La courbe de saturation est montrée le courant d'excitation nécessaire pour fournir un niveau donné de flux.

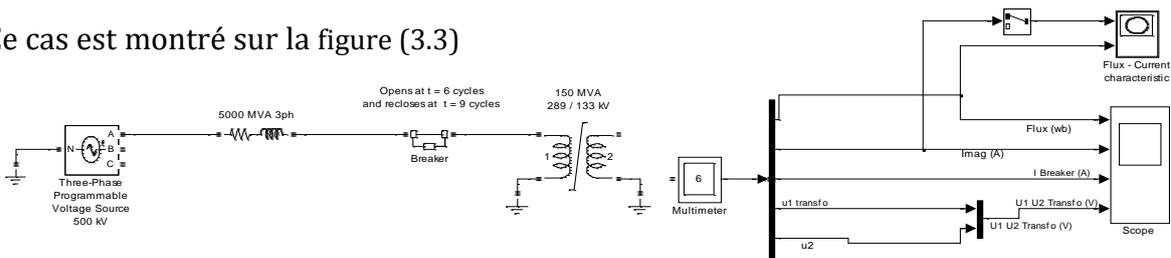
### 3.4. Partie A : Courant d'appel dans le cas d'un transformateur monophasé

Dans cette partie A un modèle de simulation d'un courant d'appel pour un transformateur monophasé a été exécuté pour les cas suivants :

- ❖ Fonctionnement en régime permanent.
- ❖ Régime transitoire
- ❖ Influence de la résistance série.
- ❖ Influence de moment de la fermeture du disjoncteur.

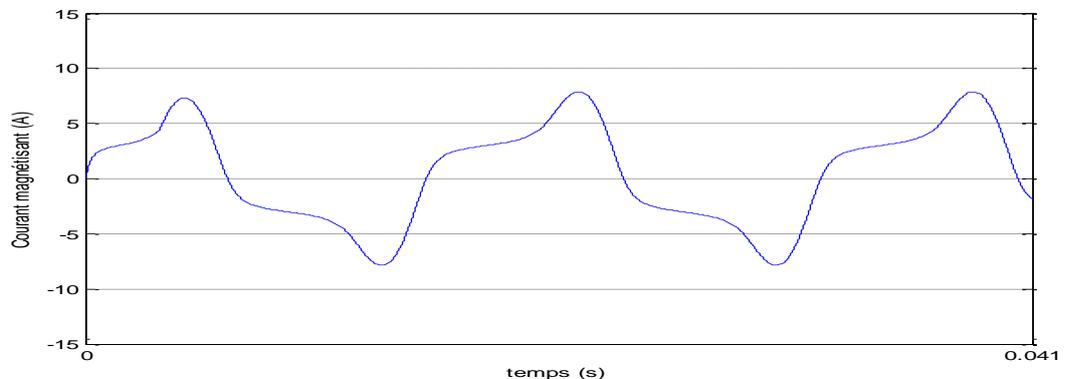
#### 3.4.1. Fonctionnement en régime permanent.

Ce cas est montré sur la figure (3.3)



**Figure 3.3.** Circuit de la simulation en régime permanent.

En régime permanent, on applique la tension nominale au primaire du transformateur d'essai avec le secondaire mis en circuit ouvert, les formes d'ondes du courant magnétisant primaire, flux en régime transitoire et de courant d'appel transitoire sont données les figures [(3.4), (3.5) et (3.6)]



**Figure 3.4.** Simulation du courant magnétisante en régime permanent de transformateur monophasé.

**Tableau 3.3** résultats de mesure

<b>Test en régime permanent</b>	
Tension U1 (V).	456 kv
Tension U2(V).	206 kv
Courant (A).	8,16 A

### 3.4.2. Régime transitoire

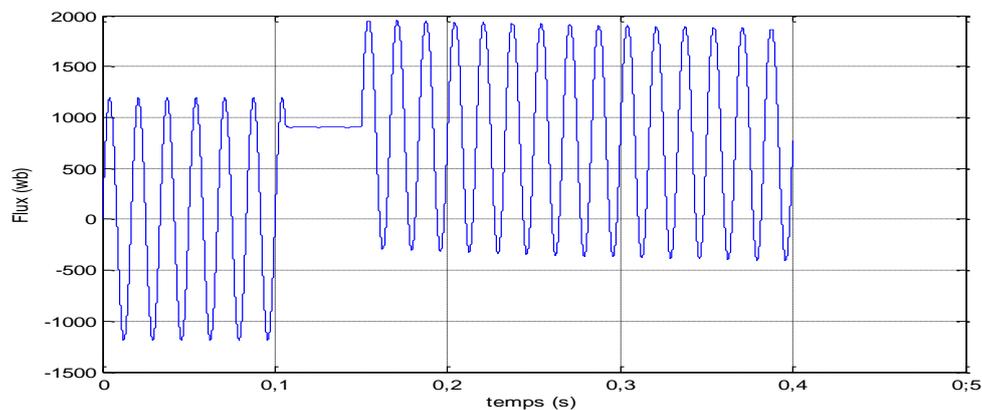
Dans cet essai, on ferme le disjoncteur. On fixe la durée de l'essai à 0.4 s. Cette durée est suffisante pour voir la première crête du courant d'appel et son atténuation jusqu'au courant nominal.

Un transformateur monophasé est connecté à un réseau (500 / 230 KV, S=150MVA).

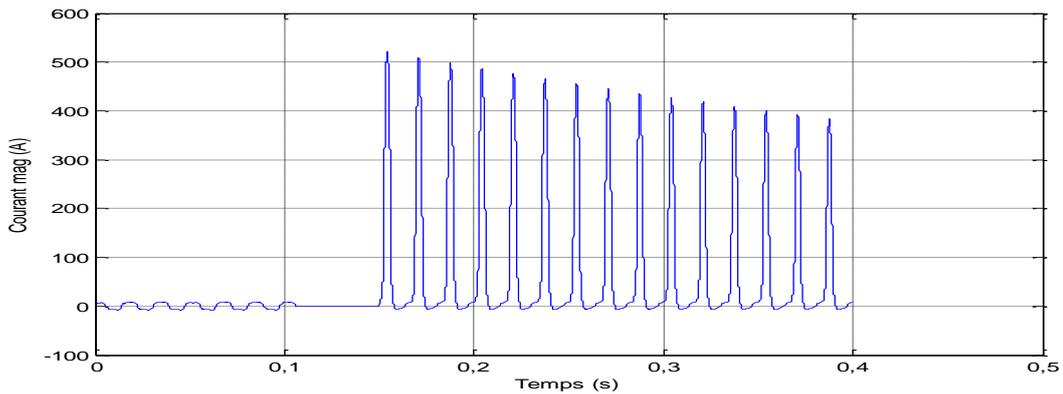
La saturation du flux de courant caractéristique du transformateur est modélisée avec l'hystérésis ou par une simple caractéristique non linéaire par morceaux.

La mise hors tension du transformateur génère peu de transitoires peut produire des courants, ces courants sont appelés « courants d'appel ».

Le disjoncteur qui est initialement ouvert à  $t = 6$  cycles (0,1 s) puis il est fermé à  $t = 9$  cycles (0,15s)

**Figure 3.5.** Simulation du flux.

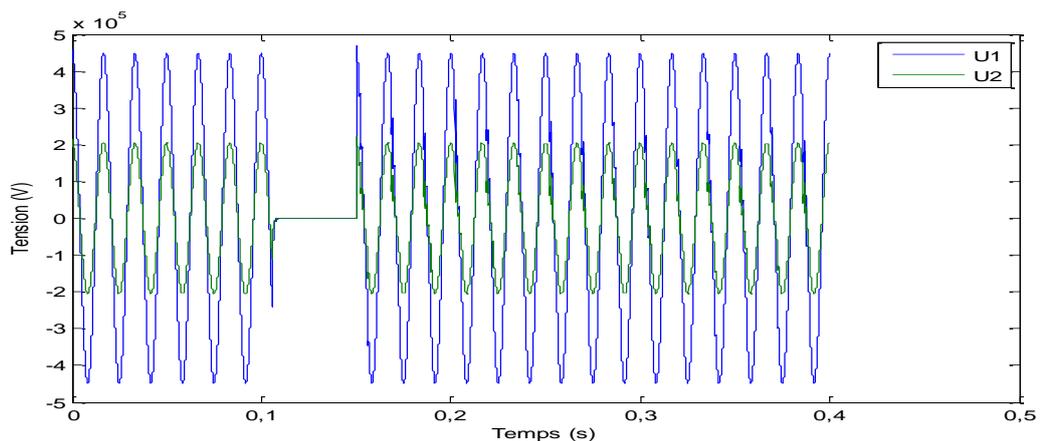
Le flux reste symétrique autour de zéro lorsque la simulation est lancée puis il est presque constant à partir de 0,1 à 0,15 puis indiquant début de saturation. À partir de 0,15 à 0,4 le flux est (1998 WB) reste piégé dans le noyau du transformateur, il est conduit le transformateur dans la région saturée.



**Figure 3.6.** Simulation du courant d'appel en régime transitoire

La simulation du courant d'appel en régime transitoire figure (3.6), après la commande d'ouverture du disjoncteur à 0,1 sec le courant indique zéro puis le courant est interrompu indiquant début de saturation à partir de 0,15 sec.

Après la Comparaison entre figure [(3.5) et (3.6)] on trouve des valeurs déferents [(I mag = 0; flux rémanent = 910,4 (Wb))], [la Saturation ((I mag = 504,8 (A)); (flux = 2007 (Wb))].



**Figure 3.7.** Tension primaire, secondaire

La tension reste symétrique autour de zéro, et nulle à partir de 0,1 jusqu'à 0,15 sec, la valeur crête de tension ( $v=437$  kv).

### 3.4.2.1. Simulation de saturation avec hystérésis

Dans le block paramètres du transformateur on a sélectionnez 'Simuler hystérésis' case à cocher. Utilisation de la «conception de Hystérésis pour charger la caractéristique d'hystérésis.



**Figure 3.8.** Interface block paramètres du transformateur

### 3.4.2.2. Modélisation du cycle d'hystérésis

Les pertes dans le noyau du transformateur peuvent être décomposées en deux catégories : Pertes en fonction du carré de la fréquence comme les pertes par courants de Foucault; Pertes dépendantes de la fréquence comme les pertes par hystérésis.

### 3.4.2.3. Pertes par courants de Foucault

Les variations du champ magnétique dans un matériau ferromagnétique génèrent par induction des courants induits (selon la loi de Faraday) qui se rebouclent sur eux-mêmes. L'écoulement de ces courants produira des échauffements locaux par effet Joule dus à la résistance du noyau. Ces pertes sont proportionnelles au carré de la fréquence.

$$P_{Rf} = K_f B_M^2 f^2 \quad (40)$$

$K_f$  : Coefficient.

$B_M$  : Champ d'induction magnétique maximal.

L'utilisation des matériaux du noyau qui ont une perméabilité  $\mu$  élevée mais d'une conductivité  $\sigma$  faible, et la structure feuilleté de noyau (lames minces isolées) peuvent réduire ces pertes.

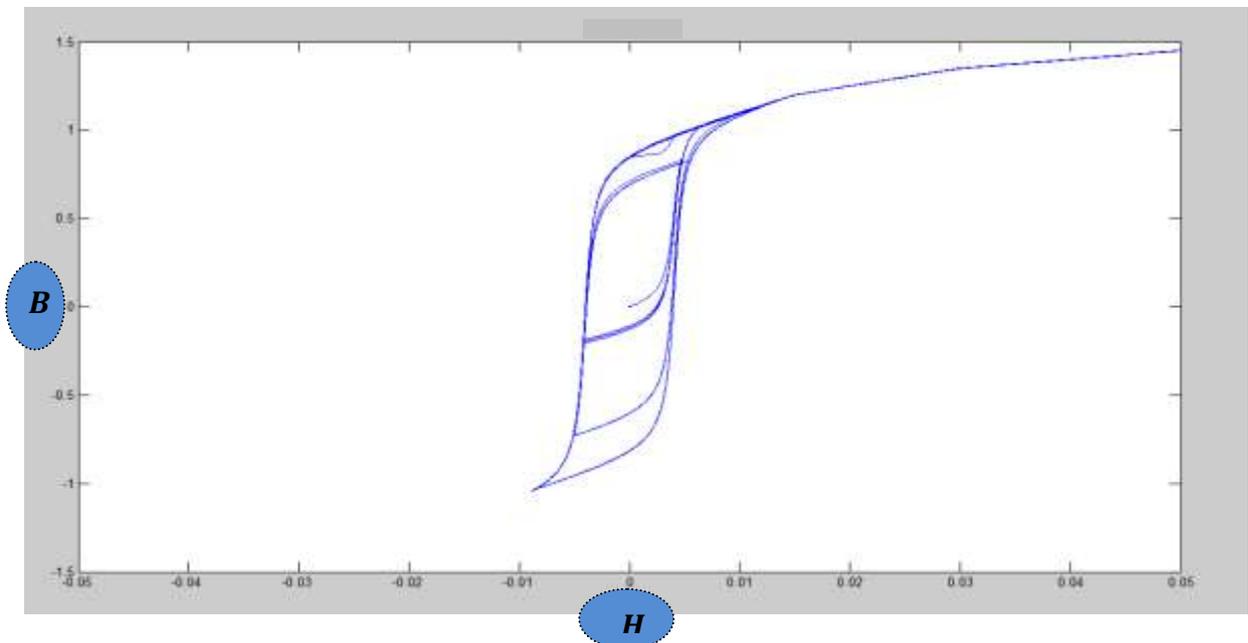


**Figure 3.9** Pertes par courant de Foucault.

#### 3.4.2.4. Pertes par hystérésis

Ce type de pertes est lié au cycle d'hystérésis du matériau. Le parcours du cycle  $B(H)$  fait apparaître une perte d'énergie qui correspond alors à un échauffement de la matière. Les pertes par hystérésis sont donc proportionnelles à la fréquence et sont liées à la structure du matériau. On peut les estimer par le calcul de la surface représenté en gris sur la figure (3.10)

$$P_{Rh} = K_h B_M^2 f \quad (41)$$

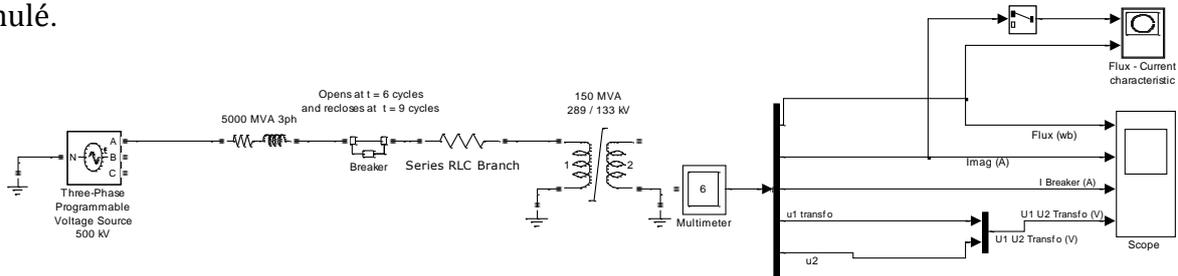


**Figure 3.10** Pertes par hystérésis.

Dans les transformateurs, on peut les limiter en utilisant des matériaux ayant un cycle étroit (matériaux doux).

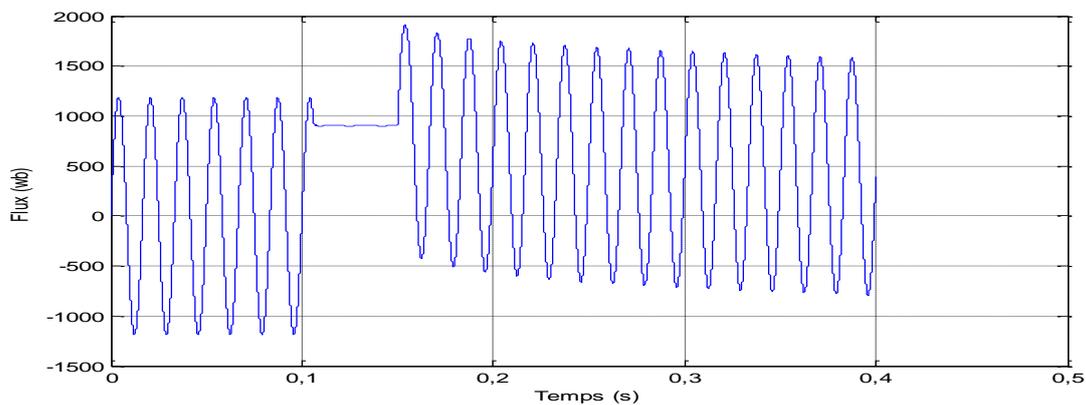
### 3.4.2.5. Influence de la résistance série.

Nous avons étudié l'influence d'une résistance variable insérée avant le transformateur. On applique les mêmes conditions sur le modèle. On obtient les formes d'onde du courant d'appel simulé.

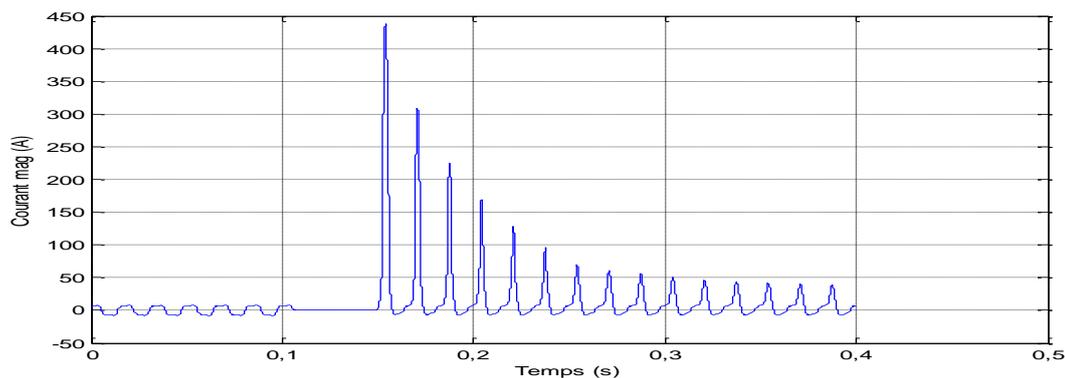


**Figure 3.11** Circuit de la simulation avec résistance en série.

Les figures [(3.12) (3.13) et (3.14)] montrent une comparaison des résultats de simulations dans le cas pour  $R = 100\Omega$ .

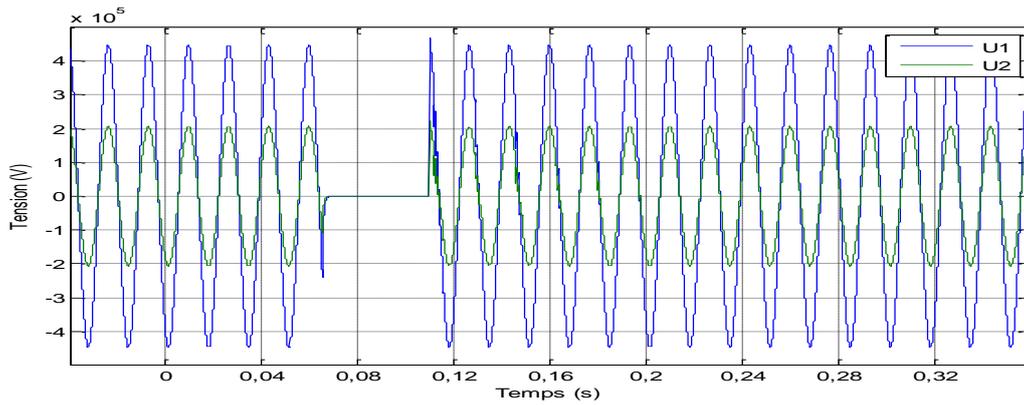


**Figure 3.12** simulations du flux dans le cas ou  $R = 100\Omega$ .



**Figure 3.13** simulations de courant d'appel dans le cas ou  $R = 100\Omega$ .

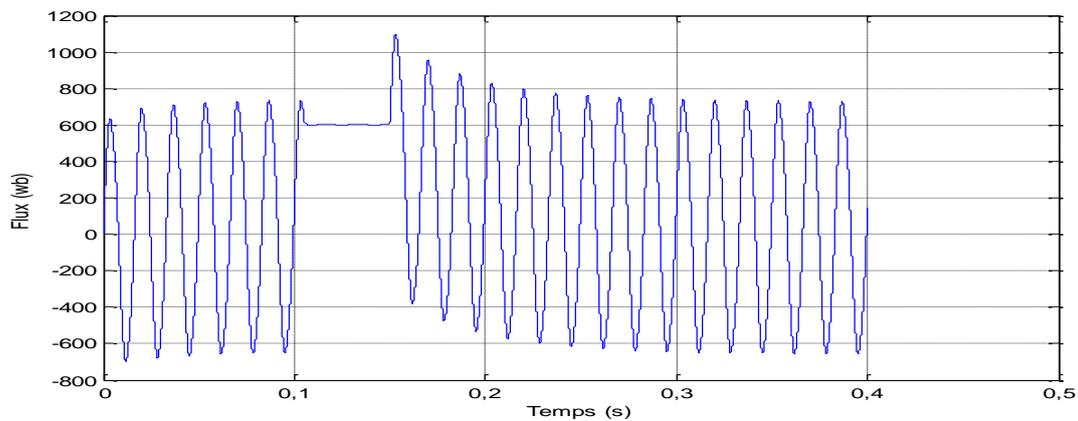
D'après cette simulation, on peut conclure que les transformateurs peuvent être affectés par des courants d'appel de très grande amplitude dans le cas à résistance faible valeur.



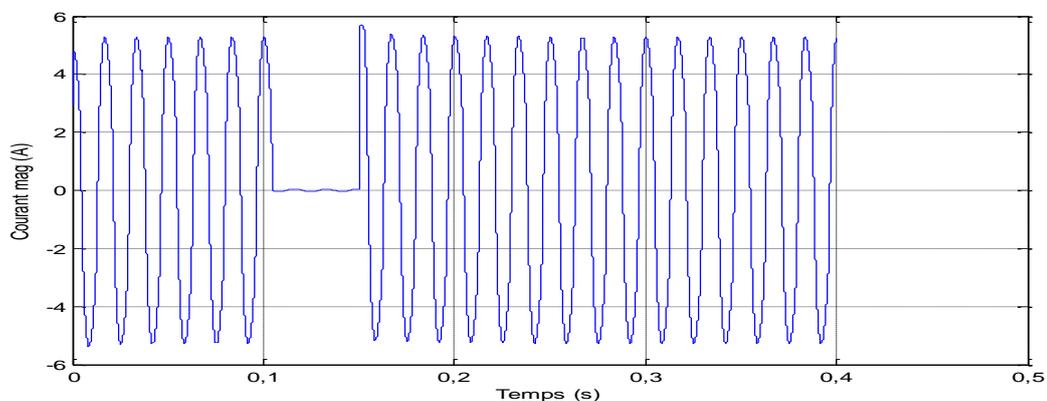
**Figure 3.14** simulations de tension dans le cas ou  $R = 100\Omega$ .

La valeur du courant d'appel maximal simulé est 437,6 A. L'amplitude du courant d'appel représente 72,93 fois l'amplitude du courant nominal du transformateur. La valeur de tension reste la même et le flux augmente. En changeant la valeur de la résistance série à plusieurs valeurs comme montre dans le tableau (3.4) ci dessous puis j'ai simule à  $R = 35000 \text{ Ohm}$ , on obtient les courbes représentées dans la figure (3.15) et les figures [(3.16) et (3.17)].

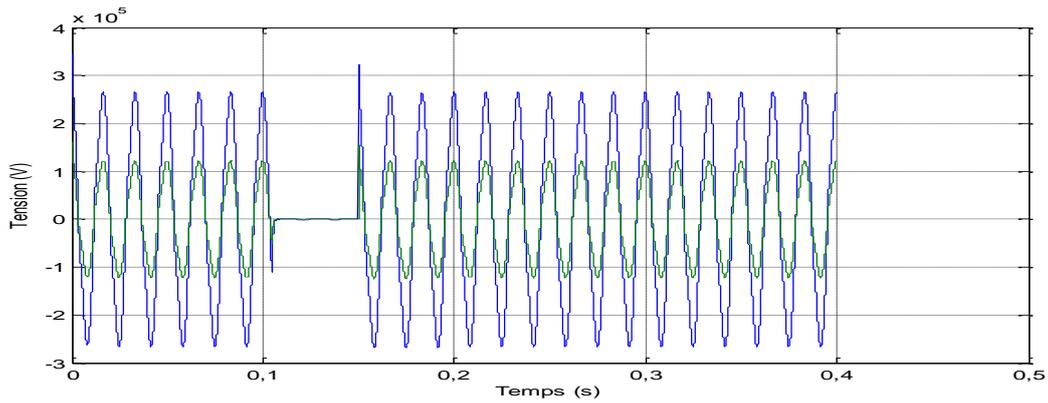
La valeur crête de courant d'appel pour  $R = 35000 \Omega$



**Figure 3.15.** Simulations du flux dans le cas ou  $R = 35000 \Omega$ .



**Figure 3.16** Simulations de courant d'appel dans le cas ou  $R = 35000 \Omega$ .



**Figure 3.17** Simulations de tension primaire, secondaire dans le cas où  $R = 35000 \Omega$ .

D'après ces résultats on constate que la première crête du courant d'appel a une valeur plus importante que les autres. Le courant d'appel a une composante continue. Il atteindra son régime permanent après une certaine durée.

Les figures [(3.15) et (3.16)] montrent l'effet de la résistance série sur l'amplitude de courant d'appel et le flux. L'augmentation de la résistance série fait diminuer l'amplitude du courant de démarrage. Elle entraîne, par ailleurs, une décroissance rapide du courant d'appel.

**Tableau 3.4.** Courant d'appel en fonction de la valeur de la Résistance série.

R ( $\Omega$ )	1 <sup>ère</sup> crête de courant d'appel (A) simulée
100	437,6
500	268,2
1000	179,4
2000	101,8
5000	40
10 e3	22,06

#### 3.4.2.6. Influence de moment de la fermeture du disjoncteur.

En deuxième lieu, l'effet de moment de la fermeture du disjoncteur. Dans cet essai la résistance est ignorée. Le premier résultat à présenté dans la figure (3.20).

La figure (3.20) présente la crête de courant d'appel simulé lors d'une fermeture de disjoncteur (pour des temps  $t = 0,1s$  à  $0,13s$ ).

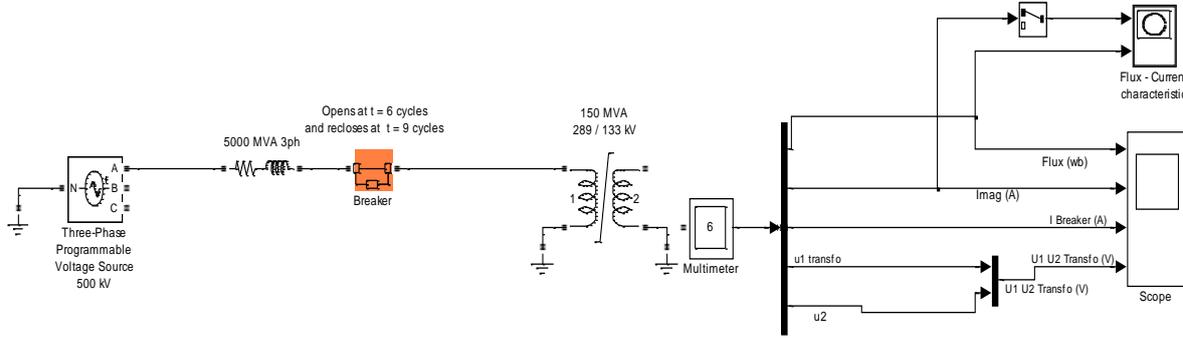


Figure 3.18. Circuit de la simulation de moment de la fermeture du disjoncteur.

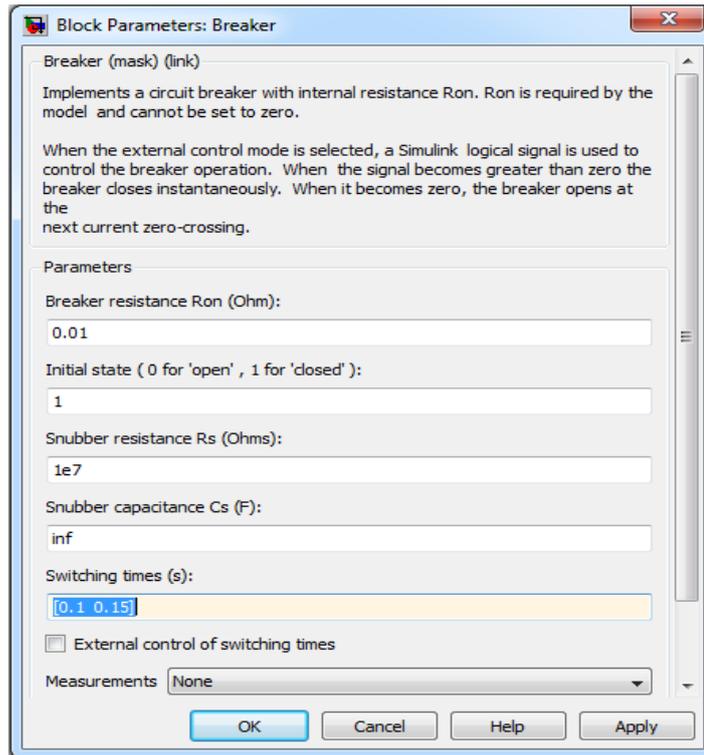


Figure 3.19 Interface block paramètres du Breaker

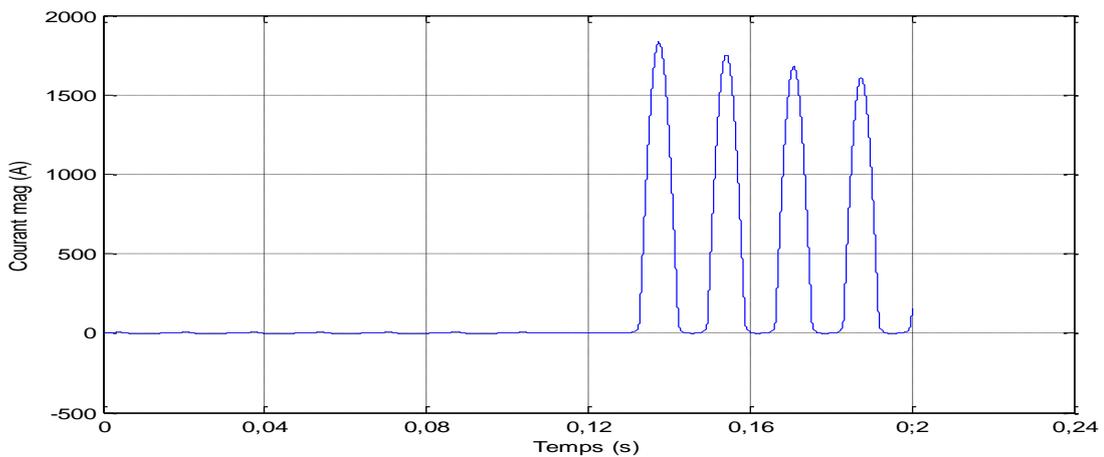
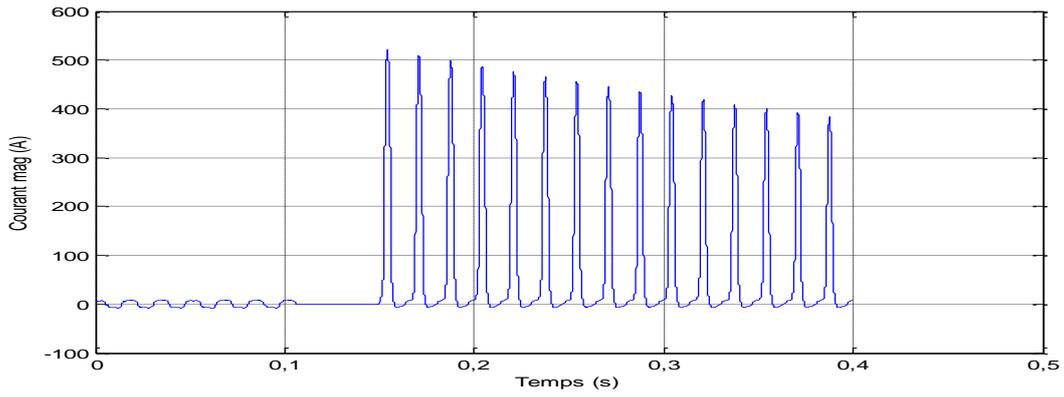
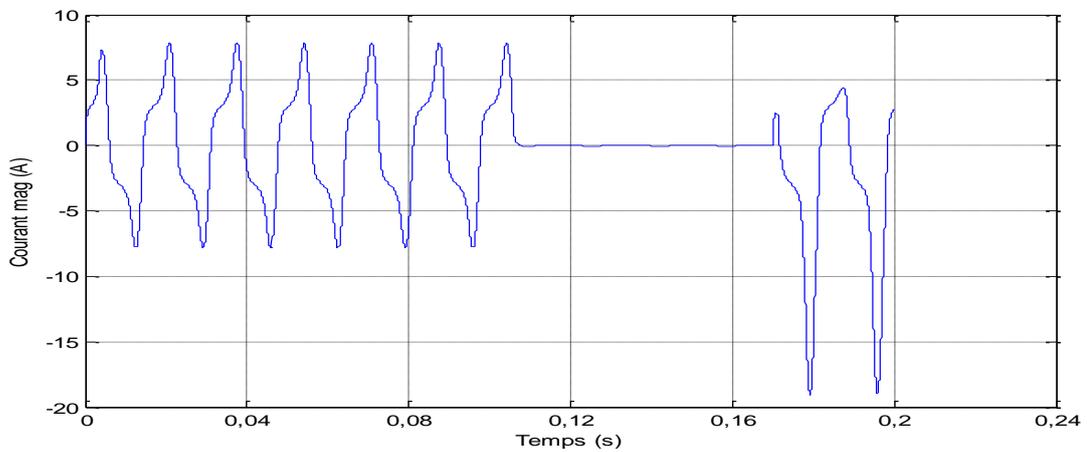


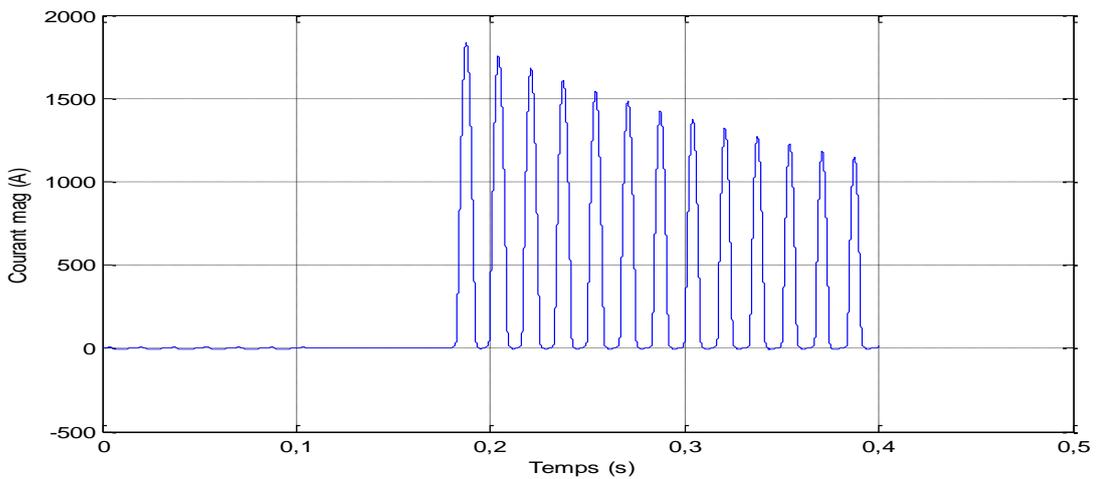
Figure 3.20 Simulation de courant d'appel pour Temps de fermeture du disjoncteur [0.1 0.13] sec



**Figure 3.21** Simulation de courant d'appel pour Temps de fermeture du disjoncteur  
[0.1 0.15] sec



**Figure 3.22** Simulation de courant d'appel pour Temps de fermeture du disjoncteur  
[0.1 0.17] sec



**Figure 3.23** Simulation de courant d'appel pour Temps de fermeture du disjoncteur  
[0.1 0.18] sec

**Tableau 3.5.** Courant d'appel pour chaque temps de la fermeture du disjoncteur

Valeur du flux au moment de fermeture (Wb)	1 <sup>ère</sup> crête de courant d'appel (A)
2730	1832
905,7	516,8
2445	1348
1418	19,5
2732	1834

La mise sous tension des transformateurs de puissance avec une fermeture aléatoire peut générer des courants d'appel très importants. Dans le but d'éviter cela, il est nécessaire de contrôler le disjoncteur pour choisir l'instant optimal en fonction de la tension du réseau (générateur) qui permet d'ouvrir ou de fermer le disjoncteur et le temps de fermeture pour le bien dans notre cas est [0.1 0.18] sec.

### 3.5. Partie B : courant d'appel dans le cas d'un transformateur triphasé

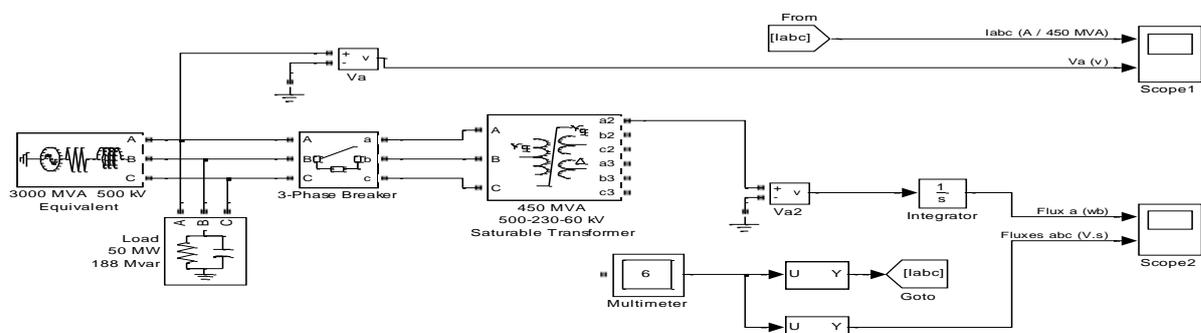
Dans cette partie en utilise un modèle transformateur triphasé pour la simulation d'un courant d'appel a été exécuté pour les cas suivants :

- Régime permanent.
- Régime transitoire.
- Proportion de courant d'appel.
- Influence de la résistance en série.
- Variation de flux rémanent.

Dans le cas triphasé, nous avons étudié deux régimes : Permanent et transitoire.

#### 3.5.1. Régime permanent :

Ce cas est montré dans la Figure (3.24)



**Figure 3.24.** Circuit de la simulation dans le cas triphasé

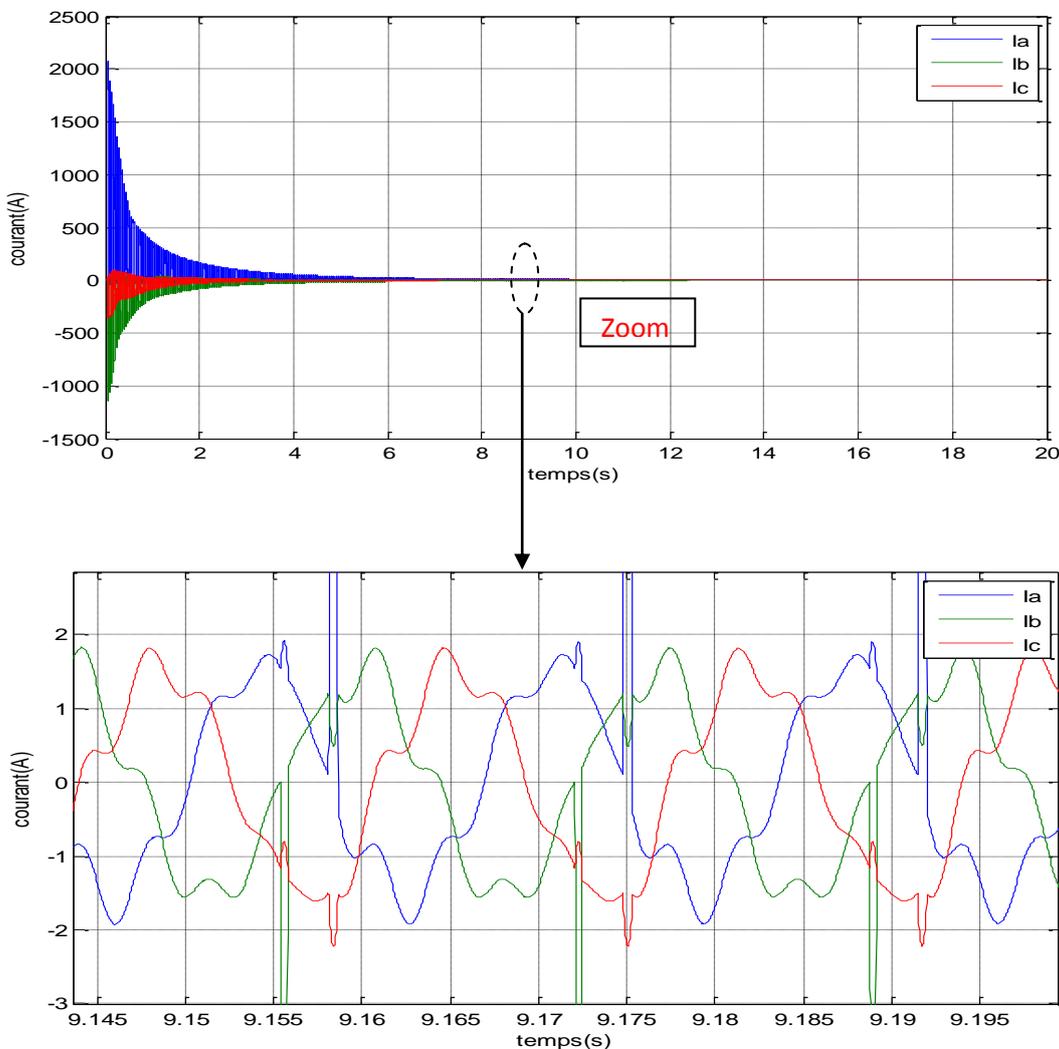
Le transformateur triphasé dans la figure (3.24) connectés en Y/Y/Delta. L'installation électrique est simulée par une source inductive et une charge de RC parallèle.

Les caractéristiques de saturation dans les trois phases (A, B et C) de transformateur sont présentées dans le tableau 3.2 précédent.

Le Multimètre et le Scope2 sont utilisés pour contrôler des signaux supplémentaires. Trois courants dans le disjoncteur et trois flux à l'intérieur du cœur du transformateur saturable.

Le flux sur la phase A est obtenu en intégrant la tension de la phase A.

En régime permanent on applique la tension nominale au primaire du transformateur avec le secondaire mis en circuit ouvert, les formes d'onde de simulations du courant magnétisant montrée dans la Figure (3.25)



**Figure 3.25.** Courant magnétisant du transformateur triphasé : (a) durant 20 s (b) Zoom (régime permanent)

### 3.5.2. Régime transitoire

Dans ce cas, nous avons étudié l'effet de la première valeur du courant d'appel, pour les cas : influence de la résistance en série et la variation de flux rémanent, dans la suite en présente le cas : proportion de courant d'appel.

#### 3.5.2.1. Proportion de courant d'appel

On va simuler le courant d'appel qui montre dans la figure(3.24), les formes d'onde de simulations du courant, tension et flux, sont montrées dans les figures [(3.26) (3.27) et (3.28)]

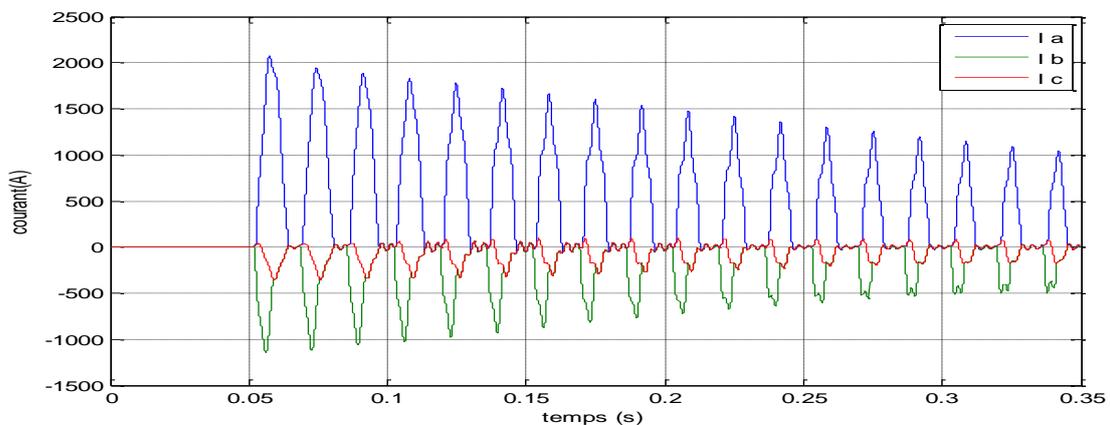


Figure 3.26. Courant magnétisant d'appel

La simulation de courant magnétisant d'appel qui montre sur la figure (3.26), il indique un début de saturation à partir de 0,06 sec.

Les valeurs crêtes du courant d'appel sont représentées dans le tableau (3.6)

Tableau 3.6 Courant d'appel des trois phases

valeurs crête de courant d'appel(A)		
Phase A	Phase B	Phase C
2074	-1149	-365.4

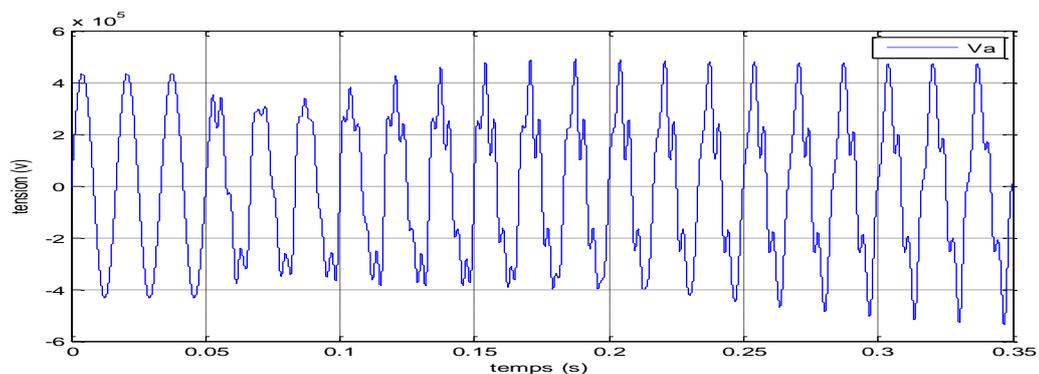


Figure 3.27. Tension du phase A

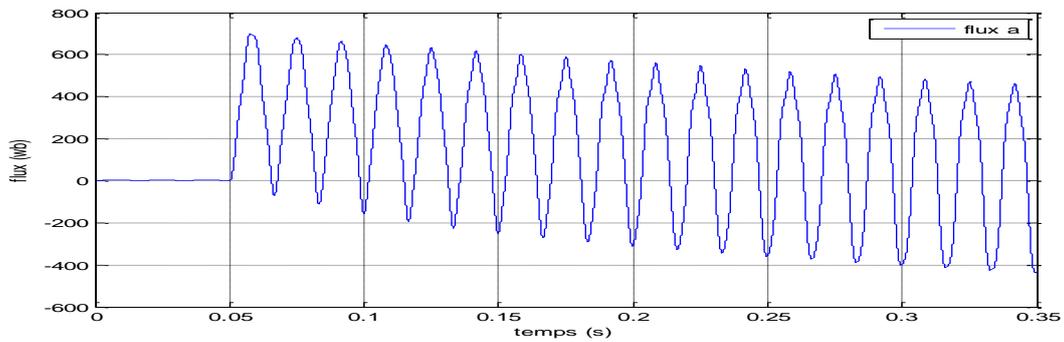


Figure 3.28. Flux du phase A

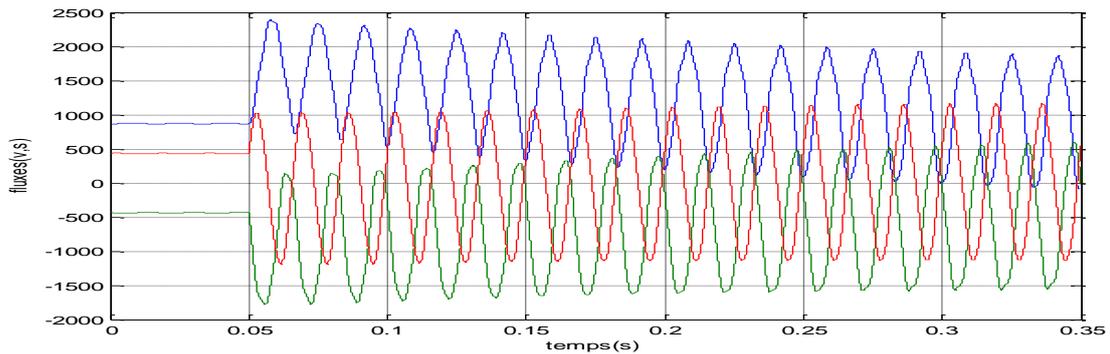


Figure 3.29. Flux des phases A, B et C.

Lorsque la simulation est lancée, la valeur de flux reste normale (0 : 0,06) puis il indique un début de saturation à temps 0,05 sec.

3.5.2.2. Influence de la résistance en série

Ce cas est montré sur la figure (3.30) ;

Nous avons étudié dans ce cas l'influence d'une résistance variable insérée avant le transformateur. On applique les mêmes conditions sur le modèle. On obtient les formes d'onde du courant, tension, flux, simulées.

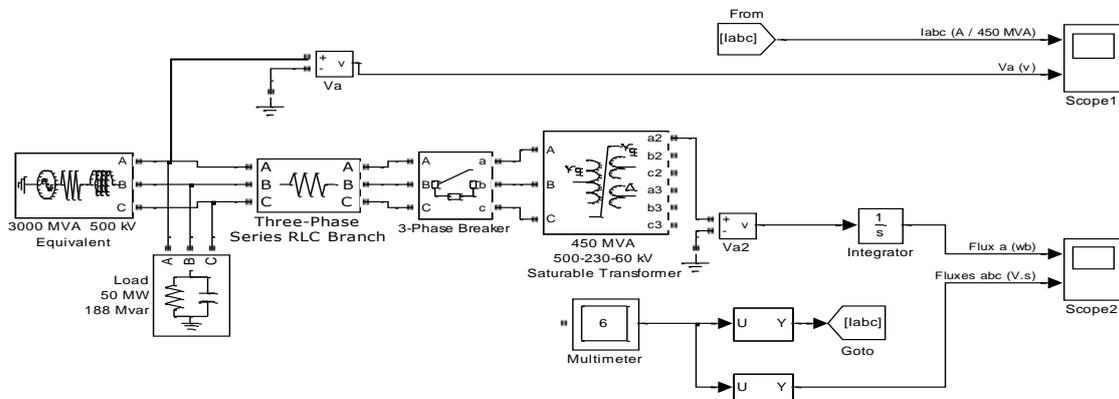


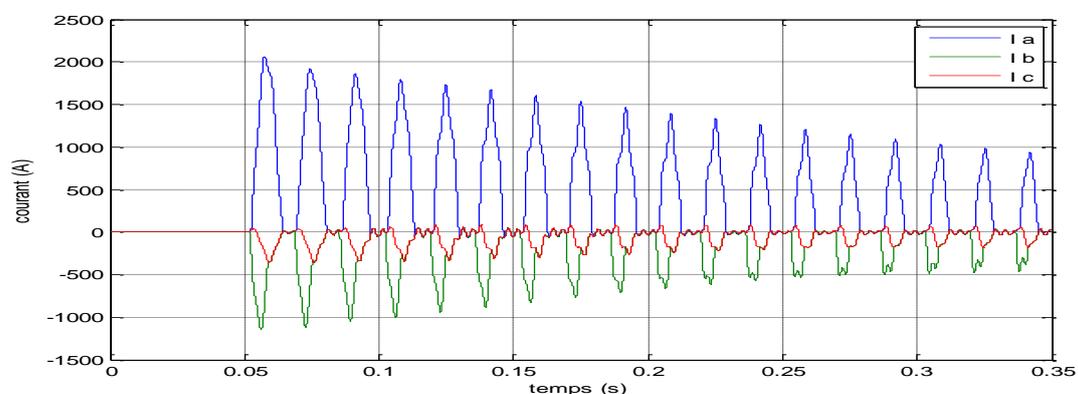
Figure 3.30 Circuit de la simulation

Les valeurs crêtes du courant d'appel sont représentées dans le tableau suivant :

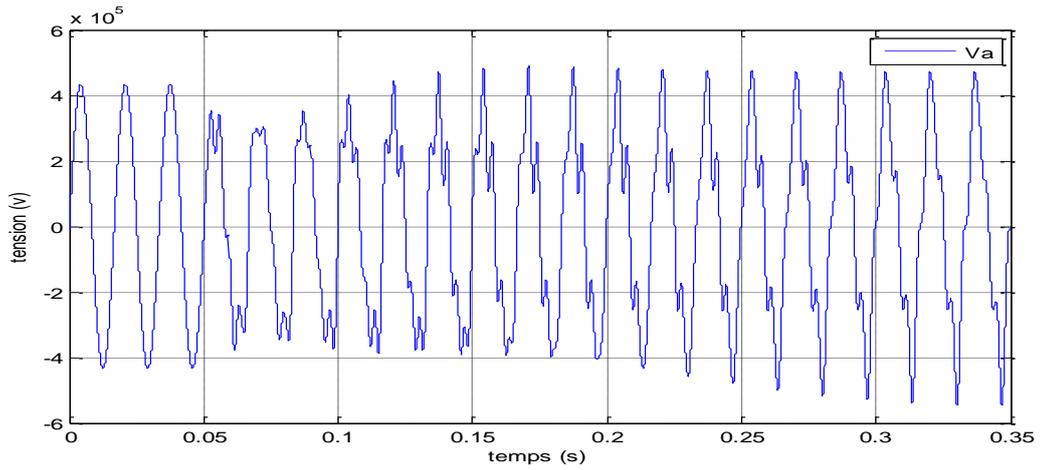
**Tableau 3.7** Courant d'appel des trois phases en fonction de la valeur de la Résistance série.

La valeur de la Résistance ( $\Omega$ )	La valeur crête de courant d'appel(A)		
	Phase A	Phase B	Phase C
1	2066	-1145	-365.4
5	2037	-1130	-365.3
10	2001	-1112	-365
25	1900	-1061	-363.1
50	1750	-984.7	-356.8
75	1621	-916.9	-348.5
100	1508	-856.7	-339
250	1046	-604.1	-282.9
500	671.1	-396.1	-219.6
750	486	-325.2	-180.5
1000	378.4	-273	-153.2
1500	261	-207	-117
1750	226.6	-184.7	-104.3
2000	200.3	-166.8	-93.97
2500	162.7	-139.6	-78.22
3000	137	-120	-66.82
3500	118.3	-105.1	-58.24
4000	104.1	-93.47	-51.56
5000	83.93	-76.33	-41.89
10000	42.66	-39.02	-21.52
20000	21.53	-19.73	-10.92
50000	8.661	-7.813	-4.507
100000	4.334	-3.857	-3.857

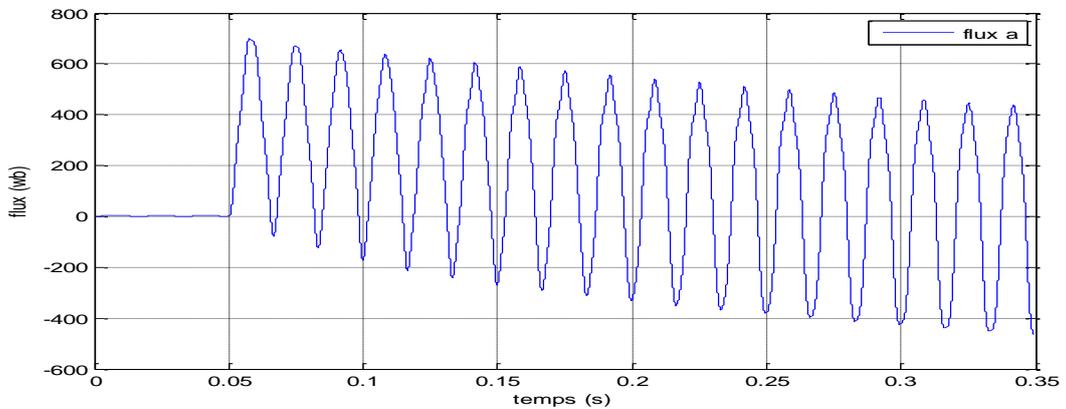
Les formes d'onde du courant, tension, flux, simulées pour une valeur de résistance  $R_s = 1\Omega$  sont montrées dans les figures [(3.31) (3.32) et (3.33)]



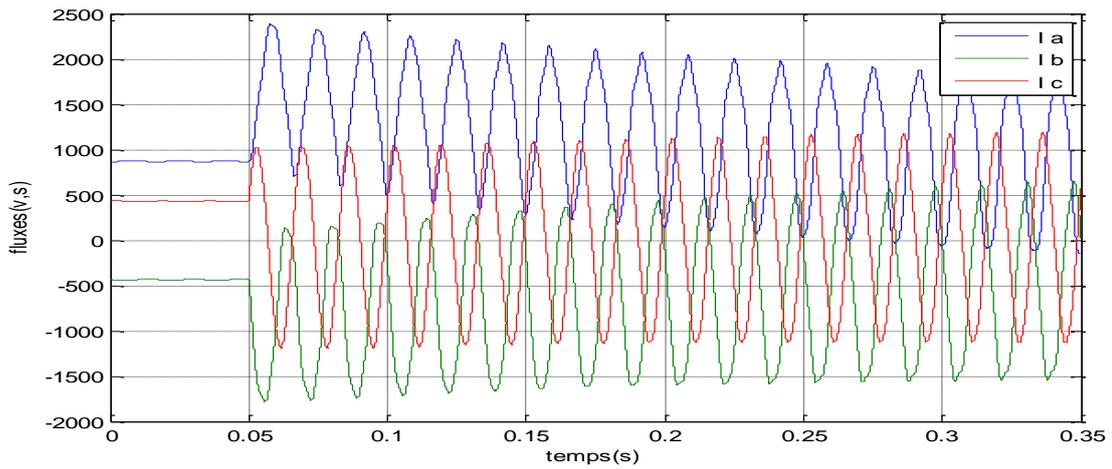
**Figure 3.31** Courant magnétisant d'appel



**Figure 3.32.** Tension du phase A



**Figure 3.33.** Flux du phase A

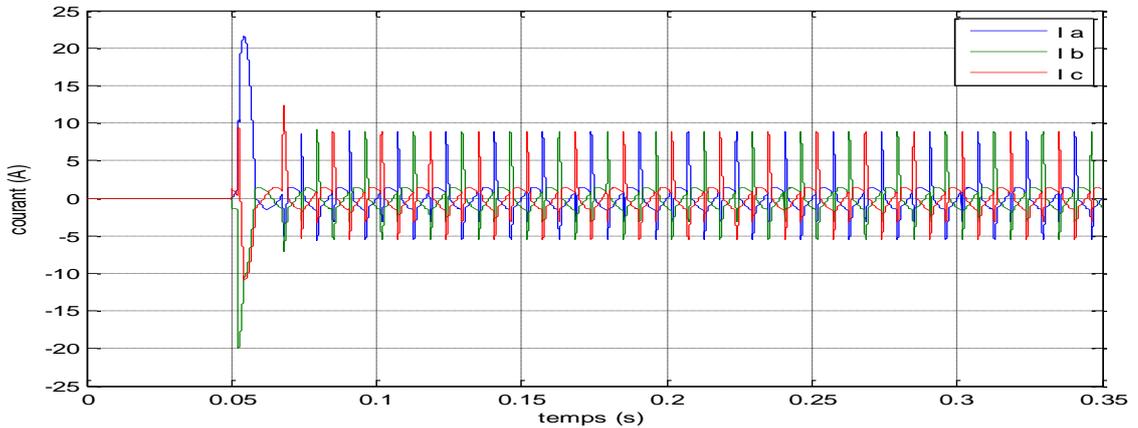


**Figure 3.34.** Flux des phases A, B et C.

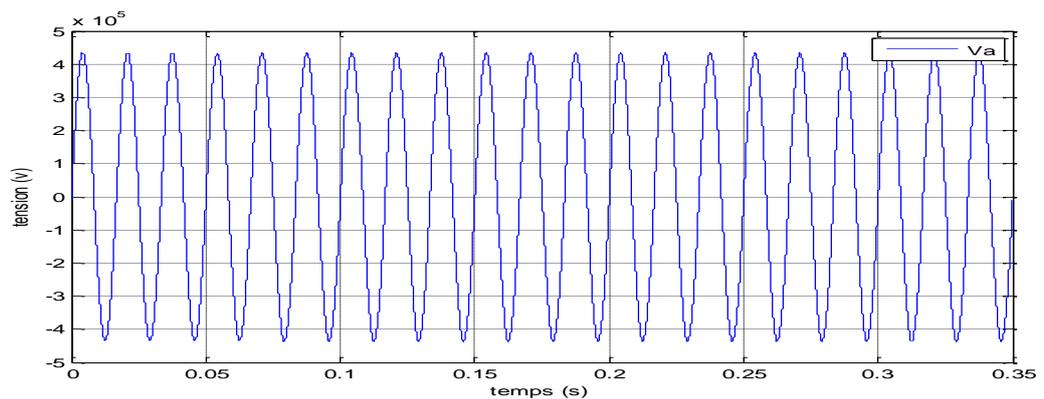
La valeur du courant d'appel maximal mesuré est égale à phase A=2066, phase B= 1145 et phase C= 365,4. L'amplitude du courant d'appel représente plusieurs fois l'amplitude du courant

nominal du transformateur. Le flux reste valeur normal lorsque la simulation est lancée puis il indique un début de saturation à temps égale à 0,06 sec, en changeant la valeur de la résistance série à 5 puis à 20000 Ohm, on obtient les courbes représentées dans les figures [(3.35), (3.36), (3.37) et (3.38)] pour  $R = 20000$  respectivement.

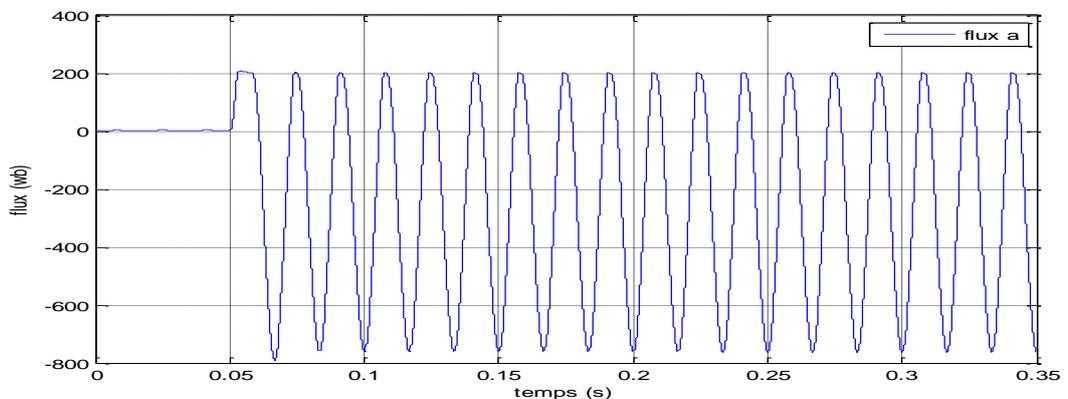
Les formes d'onde du courant, tension, flux, simulées pour une valeur de résistance  $R_s = 20000\Omega$  sont montrées dans la figure (3.35)



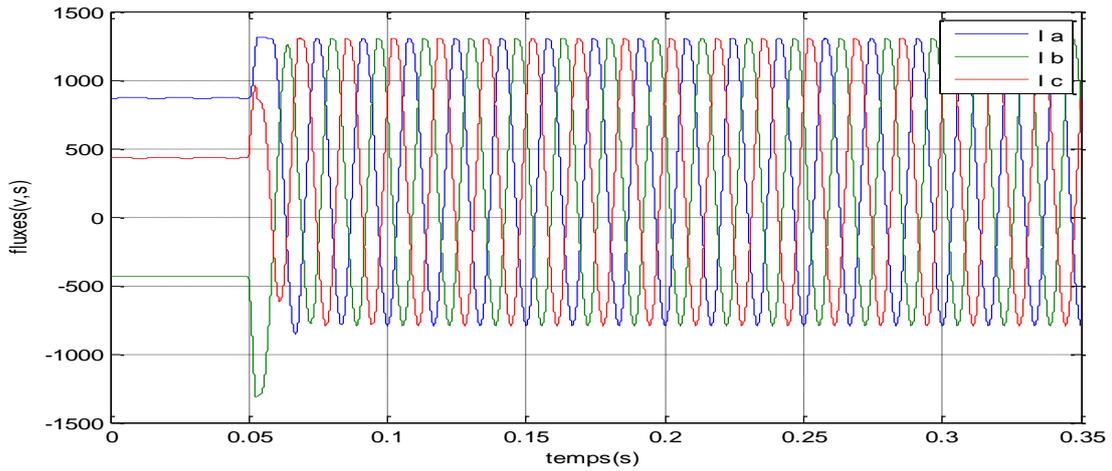
**Figure 3.35.** Courant magnétisant d'appel



**Figure 3.36.** Tension du phase A



**Figure 3.37.** Flux du phase A

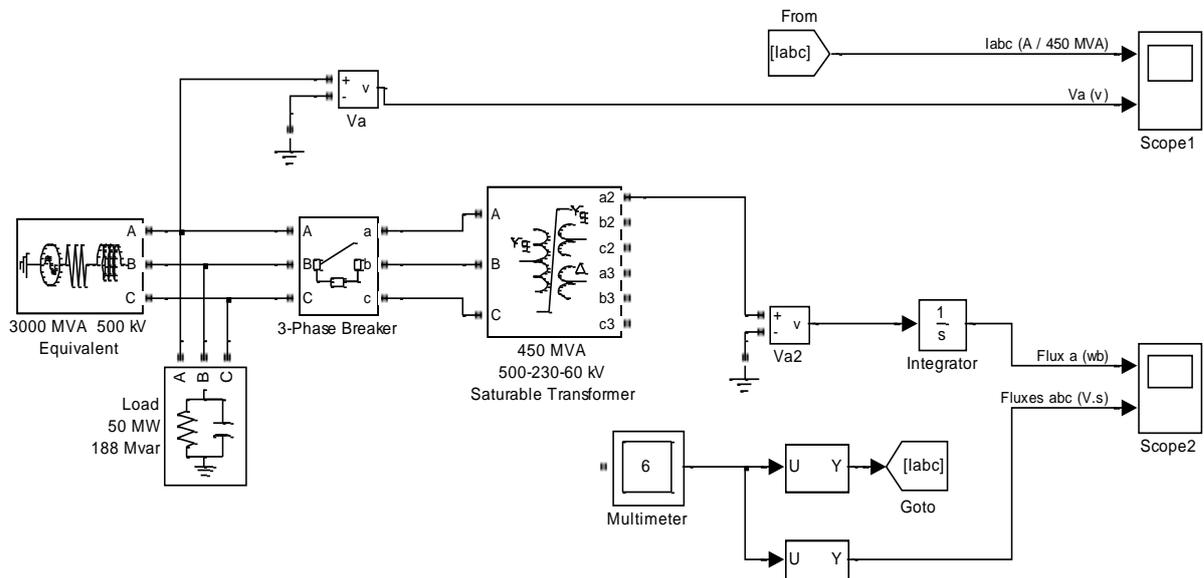


**Figure 3.38.** Flux des phases A, B et C

Les figures [(3.35), (3.36), (3.37)et (3.38)] montrent l'effet de la résistance série sur l'amplitude de courant d'appel. L'augmentation de la résistance série fait diminuer l'amplitude du courant de démarrage. Elle entraîne, par ailleurs, une décroissance rapide du courant d'appel.

**3.5.2.3. Variation de flux rémanent**

La figure (3.39) montre le bloc de simulation pour la variation du flux rémanent



**Figure 3.39.** Circuit de la simulation

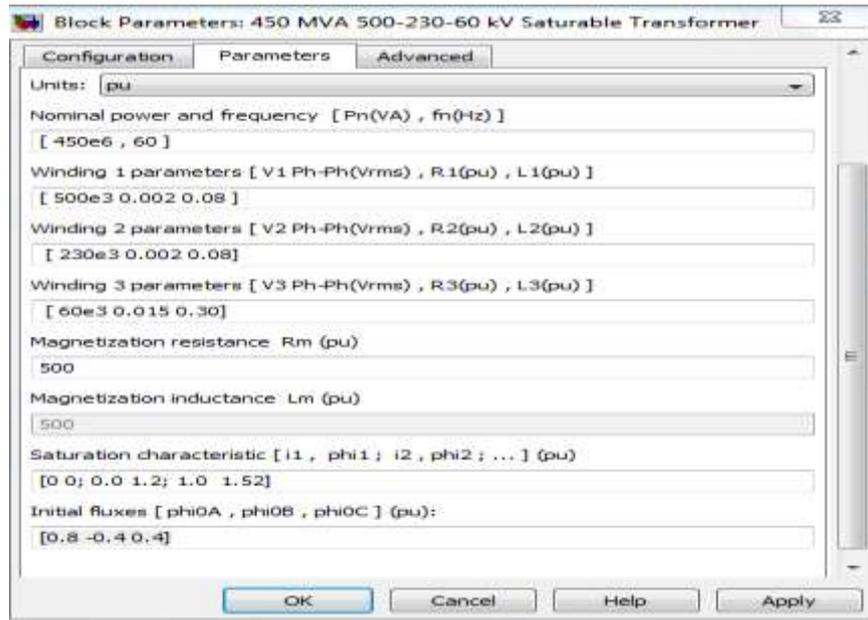


Figure 3.40. Donnée des paramètres de transformateur triphasé

Les valeurs crêtes du courant d'appel sont représentées dans le tableau (3.8).

Tableau 3.8 : Courant d'appel des trois phases en fonction de flux rémanent :

Valeur de flux rémanent (V, S)			Valeur de courant d'appel(A)		
Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
1000	-500	500	2250	-1317	-395.9
900	-450	450	2159	-1232	-377.8
800	-400	400	2074	-1149	-365.3
700	-350	350	1984	-1068	-354.3
600	-300	300	1886	-987.9	-341.4
500	-250	250	1781	-908.6	-324.8
400	-200	200	1667	-828.4	-303.8

Les formes d'onde du courant, tension, flux, simulées pour une valeur de flux rémanent phase A = 1000 ; B= -500 et C= 500 sont montrées dans les figures [(3.41), (3.42), (3.43) et ( 3.44)]

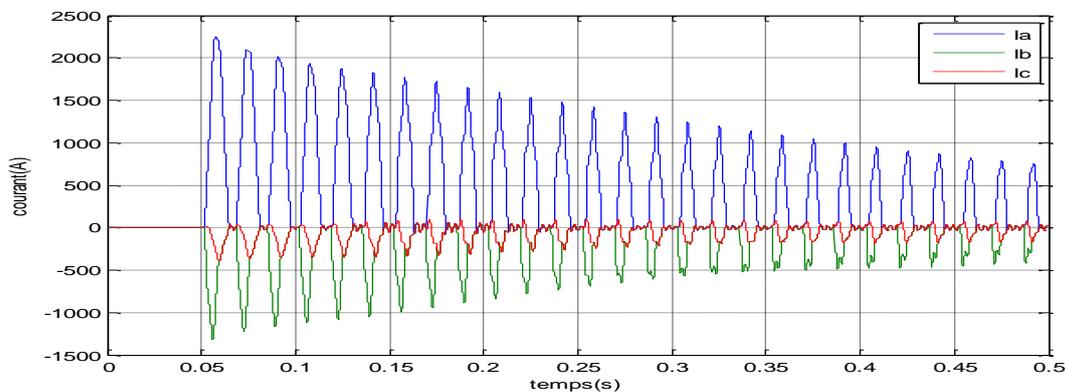
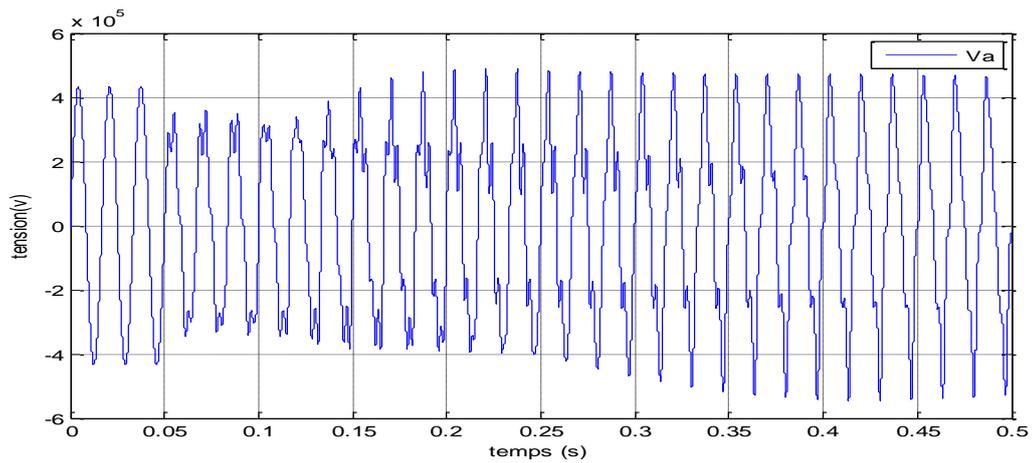
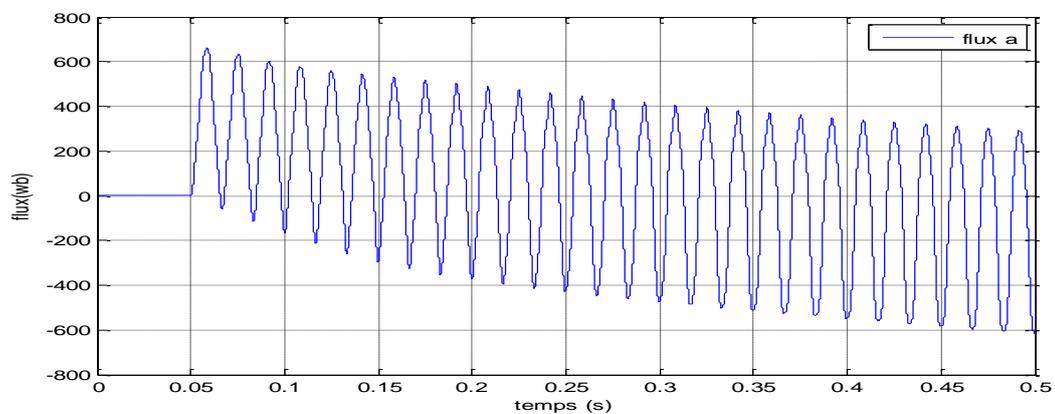


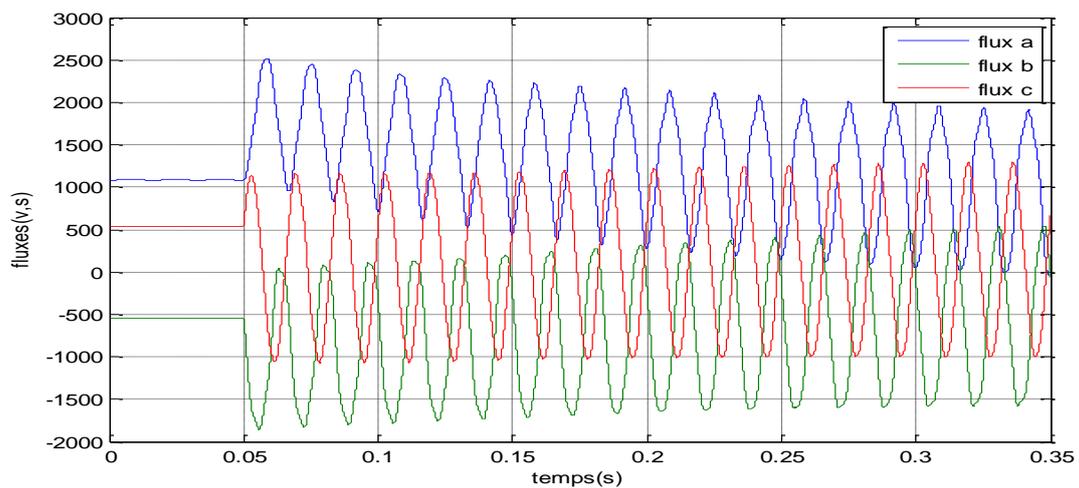
Figure 3.41. Courant magnétisant d'appel



**Figure 3.42.** Tension de phase A



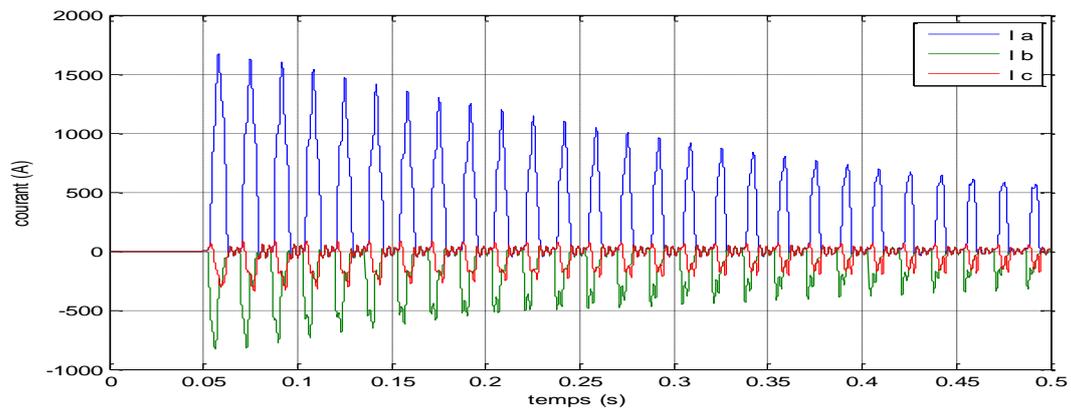
**Figure 3.43.** Flux de phase A



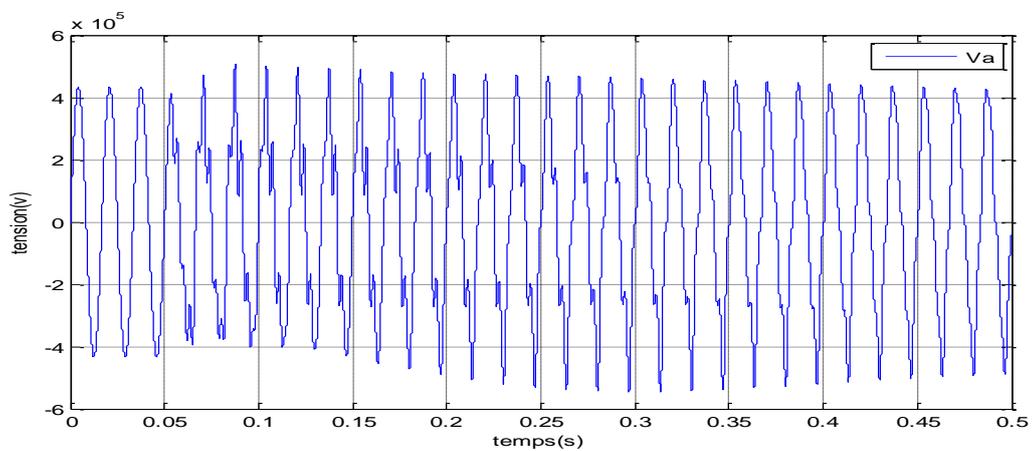
**Figure 3.44.** Flux des phases A, B et C

Les formes d'onde du courant, tension, flux, simulées pour une valeur de flux rémanent ; phase A = 400 ; B= -200 et C= 200

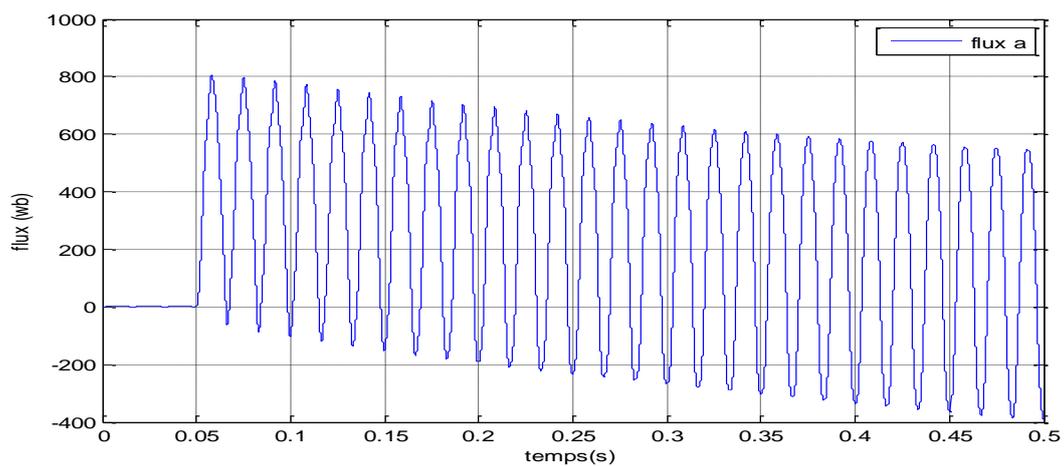
Sont montrées dans les figures [(3.45), (3.46), (3.47) et (3.48)]



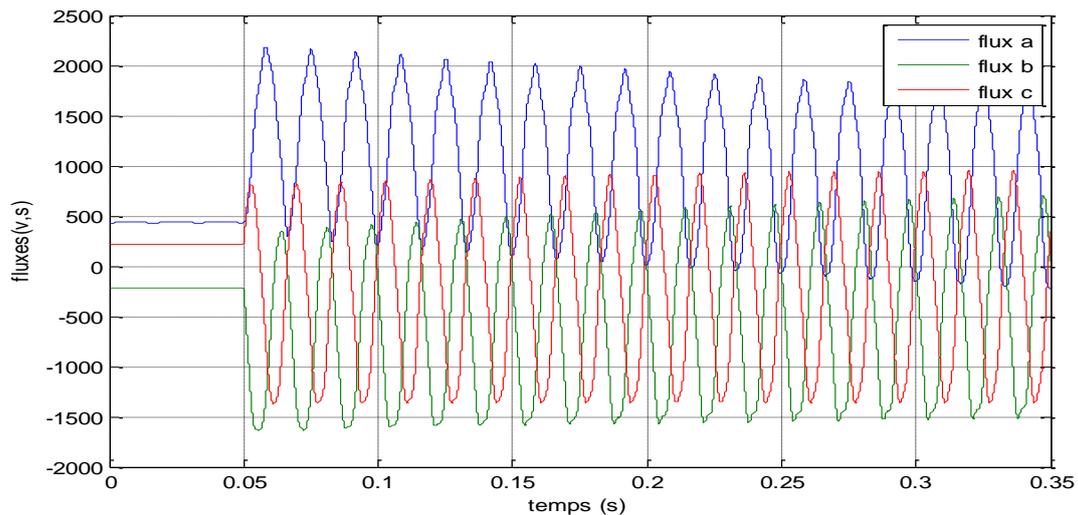
**Figure 3.45.** Courant magnétisant d'appel



**Figure 3.46.** Tension de phase A



**Figure 3.47.** Flux de phase A



**Figure 3.48.** Flux des phases A, B et C

D'après ces résultats on constate que :

Le courant de magnétisation d'appel se produit au cours de la mise sous tension de transformateur, le courant de magnétisation d'appel augmente avec l'augmentation de flux rémanent.

Le transformateur est remis sous tension par tension sinusoïdale alternatif, le flux devient sinusoïdal mais polarisé par le flux rémanent. Le flux résiduel peut être aussi enlevé (80% 90%) à flux nominal.

Si la tension de transformateur est sinusoïdale alternative, le flux devient également sinusoïdal mais déplacé selon la valeur de flux rémanent.

La première crête du courant d'appel a une valeur plus importante que les autres. Le courant d'appel a une composante continue. Il atteindra son régime permanent après une certaine durée.

### 3.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu la simulation de courant d'appel dans un transformateur monophasé et triphasé par l'utilisation de logiciel MATLAB avec l'influence de la résistance série, influence de la moment de fermeteur du disjoncteur et influence de la variation de flux rémanent. Ces application utilisé pour minimisé les effets de courant d'appel.

# CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

---

Notre travail, consacré à la modélisation d'un transformateur de puissance, en régimes transitoire, d'après les essais qu'on a réalisé aux simulations, on constate que, les transformateur est hors service, un flux résiduel demeure dans le noyau dû aux propriétés du matériel de noyau d'aimant. Le flux résiduel est de (50 à 90)% du flux de fonctionnement maximum, il dépend du type d'acier de noyau. Quand la tension est réappliquée au transformateur. Afin de maintenir ce niveau de flux dans le noyau qui peut être bien dans la gamme de saturation de l'acier de noyau, le transformateur peut débiter un courant au dessus du courant nominal du transformateur. Selon la conception de transformateur l'importance du courant d'appel (couse en service) actuelle peut être de 3.5 à 10 fois du courant nominale. Pour notre étude, nous avons conclu que la forme d'onde du courant d'appel est semblable à une onde sinusoïdale mais en grande partie de travers à la direction positive ou négative. Les valeurs réelles pour le courant d'appel dépendent de la forme de la tension-source, et les opérations de commutation se produisent.

Nous avons présenté dans la simulation de ce travail le régime transitoire suite au les formes d'onde de la simulation du courant d'appel, tension et flux dans deux types de transformateur monophasé et triphasé, par l'utilisation de logiciel MATLAB, et nous avons fait des applications sur le montage de simulation, influence de la résistance série, influence de moment de la fermeture de disjoncteur, et la variation de flux rémanent sur l'amplitude de courant d'appel ou pour minimisé les effet de courant d'appel dans un transformateur. L'amplitude de courant d'appel dépend essentiellement sur :

- Le point sur l'onde de tension à laquelle le transformateur est alimenté.
- Le flux résiduel (rémanent) dans le noyau du transformateur et son signe.
- L'impédance totale du circuit par lequel le courant d'appel coule.

Cette étude peut être complétée par la perspective suivante:

- Etude d'une manœuvre contrôlée avec le flux rémanent dans les transformateurs de puissance.

---

# REFERENCES

---

- [1] M Meziani, « contribution a la modélisation analytico-numérique des transformateurs de puissance » mémoire de magister en électrotechnique, TIZI OUZOU 2011.
- [2] M Amari, cours électrotechnique « transformateur monophasé » année universitaire 2011-2012.
- [3] Norme CEI 60076-8 « Transformateurs de puissance – Guide d’application », 1997.
- [4] N Derbel, « élaboration et mise en œuvre d'un modèle HF du transformateur a trois colonnes en vue de la simulation des surtensions transitoires transmises aux lignes BT », spécialité : Génie Electrique, Ecole Centrale De Lyon, 7 Mai 1998.
- [5] R P Bouchard Et G Olivier, « électrotechnique – deuxième édition », presses internationales polytechnique, 1999.
- [6] M Eslamian; B Vahidi et S H Hosseinian, « combined analytical and fem methods for parameters calculation of detailed model for dry-type transformer simulation modeling » Practice and Theory 18 (2010) 390–403-Science direct.
- [7] M Amari, Cours Electrotechnique « transformateur triphasé » année universitaire 2011-2012.
- [8] T Noda; H Nakamoto et S Yokoyama, «accurate modeling of core-type distribution transformers for electromagnetics transient studies», IEEE transaction on power delivery, vol. 17, no. 4, October 2002.
- [9] CH Guerin, « détermination des pertes par courants de Foucault dans les cuves des transformateurs-modélisation des régions minces et prise en compte de la saturation des matériaux magnétiques en régime harmonique» thèse de doctorat institut national polytechnique de Grenoble, 1999.
- [10] I HENNEBIQUE et C FLUERASU, « RESEL : programme conversationnel pour l'analyse des régimes transitoires dans les réseaux électriques », EDF, bulletin de la direction des études et recherches, série B, No 1, 1987, pp. 25-33.
- [11] H W DOMMEL, «EMTP Theory Book » Bonneville, 1986.
- [12] A YAHIOU, « contribution à l’étude et à l’analyse du régime transitoire dans les transformateurs de puissance », mémoire de magister, 2012, UFSA Sétif.
- [13] V COSTAN, « convertisseurs parallèles entrelacés : étude des pertes fer dans les transformateurs inter-cellules » thèse de doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, octobre 2007.

- [14] CW Trowbridge; JK Sykulski, « some key developments in computational electromagnetics and their attribution » IEEE transactions on magnetics, vol. 42, n° 4, April 2006, p. 503-508.
- [15] G Fournet, « électromagnétisme » technique de l'ingénieur, vol. D 1 020, 2001, traité convertisseurs et machines électriques, 1993, p. 1-89.
- [16] G Dhatt ; G Touzot, Emmanuel Lefrancois « méthode des éléments finis » édition hermès Lavoisier ; paris, 2005.
- [17] T Henneron, « contribution à la prise en compte des grandeurs globales dans les problèmes d'électromagnétisme résolus avec la méthode des éléments finis » thèse de docteur de l'université de Lille, année 2004.
- [18] A Lefèvre, « Contribution a la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs: Application a l'étude de l'échauffement sur charges non lineaires » Electric power. Université de Nantes, 2006. French.
- [19] X. Brunotte, « modélisation de l'infini et prise en compte de régions magnétiques minces – application à la modélisation des aimantations de navires », spécialité : electrotechnique, Institut National Polytechnique de Grenoble, 18 Décembre 1991.
- [20] J Jin, «The Finite Element Method in Electromagnetics » wiley-interscience publication, john Wiley & sons Inc, 1993.
- [21] T Liu, Thèse De Doctorat « manœuvre contrôlée des transformateurs de puissance avec flux rémanent » supélec 2011.
- [22] A Beboukha ; M Ghilani, Master Académique « modélisation et simulation de la protection différentielle d'un transformateur de puissance » El Oued 2014.

**Résumé :**

Le transformateur est le composant permettant d'élever l'amplitude de la tension alternative disponible à la sortie de l'alternateur pour l'amener aux niveaux requis pour le transport. A l'autre bout de la chaîne, de la cote des consommateurs, les transformateurs sont utilisés pour abaisser la tension et la ramener aux valeurs utilisées dans les réseaux de distribution. Le courant d'appel de magnétisation « des courant de formes asymétriques de très grand amplitudes », se produit au cours de la mise sous tension du transformateur, résulte généralement du courant de pleine charge qui réduire la qualité de l'alimentation. La thèse s'inscrit dans le cadre du projet pour les études des effets de saturation des transformateurs de puissance, à partir de la simulation de courant d'appel, comme un phénomène d'enclenchement de transformateur de puissance, ce travail présenté avec trois méthodes qui permet de minimisé les effet de courant d'appel ; influence de la résistance en série ; le moment de fermeture de disjoncteur et la variation de flux rémanent, dans le cas monophasé et triphasé.

**Mot clé :** Transformateur, modélisation, simulation, saturation, Flux rémanent, courant d'appel, MATLAB.